

**КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний
(повна назва факультету)

Приладобудування
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.051003 Приладобудування

на тему: Ультразвуковий витратомір

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ПІ-51
(шифр групи)

Фотул Едуард Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ к.т.н, доц., Писарець А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Технологічний проф., д.т.н. Антонюк В.С.

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) _____ Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра _____ Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.051003 Приладобудування
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Д. Гераїмчук _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту**

Фотулу Едуарду Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Ультразвуковий витратомір
керівник проекту Писарець Анна Валеріївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. № 1384-с

2. Термін подання студентом проекту 07 червня 2019 р.

3. Вихідні дані до проекту 3.1 Вимірюване середовище – вода. 3.2 Номінальний діаметр $D_n=40 \cdot 10^{-3}$ м. 3.3 Діапазон вимірюваних витрат, $\text{м}^3/\text{год}$: $Q_{\min}=0,1$; $Q_{\max}=20$. 3.4 Перепад тиску при Q_n – не більше 10 кПа. 3.5 Максимальний робочий тиск вимірюваного середовища – 2,5 МПа. 3.6 Температура вимірюваного середовища, $^{\circ}\text{C}$: + 20 - +150. 3.7 Температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$: +5 ÷ +55. 3.8 Допустима відносна похибка, % – 1,5. 3.9 Ступінь захисту IP65.

—

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

а) проектно-конструкторський розділ. Огляд та аналіз існуючих витратомірів. Розробка схеми вимірювання. Розробка математичної моделі витратоміра. Розрахунки конструктивних елементів приладу. Розрахунки метрологічних характеристик витратоміра. Розробка конструкції приладу.

—

б) технологічний розділ. Опис конструкції приладу. Розрахунок критерій технологічності. Розрахунок параметричної точності складання. Проектування технологічного процесу складання

5. Перелік (ілюстративного) графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів тощо) 5.1. Принципова схема витратоміра, 1 арк. ф. А2. 5.2. Витратомір. 3-D модель, 1 арк. ф. А2. 5.3. Витратомір. Складальний кресленник, 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей, 1 арк. ф. А1. 5.5. Графічні матеріали, 1 арк. ф. А1.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	Антонюк В. С., проф., д. т. н.		

7. Дата видачі завдання 12.05.2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Ознайомлення із ТЗ.</i>	<i>12.05.19 – 15.05.19</i>	
2	<i>Проведення аналізу патентних та літературних джерел</i>	<i>12.05.19 – 20.05.19</i>	
3	<i>Розроблення структурної і принципової схем приладу</i>	<i>17.05.19 – 21.05.19</i>	
4	<i>Розробка конструкції приладу</i>	<i>20.05.19 – 25.05.19</i>	
5	<i>Вибір та розробка основних елементів та вузлів</i>	<i>20.05.19 – 28.05.19</i>	
6	<i>Визначення та дослідження метрологічних характеристик приладу</i>	<i>20.05.19 – 30.05.19</i>	
7	<i>Виконання технологічного розділу</i>	<i>20.05.19 – 30.05.19</i>	
8.	<i>Виконання графічної частини</i>	<i>26.05.19 – 03.06.19</i>	
9	<i>Аналіз отриманих результатів</i>	<i>26.05.19 – 29.05.19</i>	
10	<i>Оформлення ПЗ та ілюстративного матеріалу</i>	<i>29.05.19 – 07.06.19</i>	
11	<i>Подача дисертації на перевірку</i>	<i>07.06.19</i>	

Студент

(підпис)

Е. П. Фотул
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

А. В. Писарець
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

Анотація

Дипломний проект складається з вступу, двох розділів, висновків, переліку літературних джерел та додатків. Проект містить 63 сторінки, 26 рисунків, перелік використаних джерел з 19 найменувань, 3 додатків.

Метою роботи є створення ультразвукового витратоміра, виконання розрахунків метрологічних, конструктивних і технологічних характеристик приладу.

Для досягнення мети проаналізовано ультразвукові методи вимірювання витрати, їх переваги і недоліки, розроблено схему вимірювання на підґрунті наявних особливостей час-імпульсного методу. Визначено метрологічні характеристики приладу.

У технологічному розділі була описана конструкція приладу, розраховані критерії технологічності приладу, параметричної точності складання та розроблено схеми технологічного процесу складання.

Ключові слова: витрата, рідина, ультразвуковий метод, час-імпульсний метод, швидкість потоку, тиск, ультразвуковий сенсор.

Anotation

The diploma project consists of an introduction, two sections, conclusions, a list of literary sources and applications. The project contains 63 pages, 26 figures, list of sources used from 19 titles, 3 applications.

The purpose of the work is to create ultrasonic flowmeter, to do the calculations of metrological, constructive and technological characteristics of the flowmeter.

To achieve the goal, ultrasonic methods for measuring volume flow, their advantages and disadvantages are analyzed.

Keywords: flowrate, liquid, ultrasonic method, time-pulse method, flow rate, pressure, ultrasonic sensor.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ПРОЕКТНО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ	8
1.1 Огляд та аналіз існуючих витратомірів	8
1.2 Розробка схеми вимірювання	13
1.3 Розробка математичної моделі витратоміра	19
1.4 Розрахунок конструктивних елементів витратоміру	26
1.5 Розрахунок метрологічних характеристик витратоміра	34
1.6 Опис конструкції ультразвукових сенсорів	40
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ	44
2.1 Опис конструкції приладу.....	44
2.2 Розрахунок критерії технологічності приладу.....	45
2.3 Розрахунок параметричної точності складання.....	50
2.4 Проектування технологічного процесу складання.....	54
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	58
ДОДАТКИ	

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ									
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата										
Розроб.	Фотцл Е. П.									Лім.	Арк.	Аркушіів		
Перевір.	Писарець А. В.											5		
										ПБФ				
Н. Контр.														
Затвер.														

ВСТУП

Залежно від агрегатного стану всі речовини можуть знаходитися в твердому, рідкому і газоподібному станах. Рідкий і газоподібний у гідромеханіці об'єднують поняттям «рідини», які, у свою чергу, поділяють на ті, що мало стискаються (крапельні), і ті, що стискаються, тобто змінюють свій об'єм; розрізняють також пару як газоподібну речовину з нестійким агрегатним станом [1, 2]. Далі в проекті під терміном «речовина» будемо розуміти деяке текуче середовище (ТС) – будь-яка рідина, газ, пара або їх суміш, яка транспортується (переміщуються) у закритому каналі (трубопроводі).

Витрата – це кількість речовини в одиницях маси (кг) або об'єму (м^3), яка протікає через переріз трубопроводу за одиницю часу [3].

Сучасні цифрові технології дозволяють визначати витрату речовини, накопичувати дані щодо кількості речовини за деякий інтервал часу на виході первинного перетворювача будь-якого типу, тому, через непринципову відмінність від термінів «витратомір» і «лічильник», далі за текстом будемо використовувати термін «витратомір».

Гази і рідини, навіть одного виду за реальних умов можуть відрізнятися за компонентним складом у досить широких межах [3, 4], тобто вони можуть мати різні параметри: фізичні якості ТС, теплопровідність, теплоємність тощо. Ці параметри змінюються при зміні температури або тиску і обумовлюють додаткові похибки при виконанні вимірювань. Тому вимірювання витрати текучого середовища зазвичай має доповнюватися контролем і обліком температури, тиску та теплофізичних параметрів ТС.

Акустичними називаються витратоміри, що базуються на вимірюванні витрати залежної від того чи іншого ефекту, що виникає при проході акустичних коливань через потік рідини або газу. Майже всі застосовувані на практиці акустичні витратоміри працюють в ультразвуковому діапазоні частот і тому називаються ультразвуковими.

Ультразвукові витратоміри зазвичай використовуються для вимірювання об'ємної витрати, оскільки ефекти, що виникають при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані зі швидкістю останнього. Але шляхом додавання акустичного перетворювача, який реагує на густину вимірюваної речовини, можна здійснити і вимір масової витрати. Похибка ультразвукових витратомірів знаходиться в межах від 0,1 до 2,5%, але в середньому може бути оцінена значеннями 0,5-1%. Значно частіше витратоміри застосовують для вимірювання витрати рідини, а не газу, внаслідок малого акустичного опору газу і труднощів отримання в ньому інтенсивних звукових коливань. Ультразвукові витратоміри підходять для трубопроводів будь-якого діаметру, починаючи від 10 мм і більше.

Існуючі витратоміри дуже різноманітні як за принципом дії первинних перетворювачів, так і за схемами застосування. При вимірюванні витрати в рідинах без домішків зазвичай застосовують високі частоти (0,1-10 МГц) акустичних коливань. При вимірюванні же забруднених речовин частоти коливань доводиться істотно знижувати аж до декількох десятків кілогерц щоб уникнути розсіювання і поглинання акустичних коливань. Необхідно, щоб довжина хвилі була на порядок більше діаметру твердих частинок або повітряних бульбашок. Низькі частоти застосовують також при вимірюванні витрати газів [5].

РОЗДІЛ 1

ПРОЕКТНО КОНСТРУКТОРСЬКИЙ

1.1 Огляд та аналіз існуючих витратомірів

Принцип роботи ультразвукових витратомірів заснований на тому, що при розповсюдженні ультразвукових коливань в текучому середовищі швидкість ультразвуку відносно нерухомої системи координат (стінок трубопроводу) дорівнює векторній сумі швидкості ультразвуку відносно середовища і швидкості самого середовища відносно трубопроводу.

Наприклад, якщо в трубопроводі встановлені два випромінюючі п'єзоелементи, один з яких випромінює ультразвукову хвилю за напрямом потоку, а другий – проти нього і два приймачі акустичних коливань, які знаходяться на однаковій відстані від випромінювачів. Ці дві пари випромінюючих та приймаючих п'єзоелементів утворюють два акустичні канали. У випадку коли текуче середовище не рухається довжина хвилі обох каналів буде однакою, але коли рідина рухається сигнали каналів утворюють хвильову різницю, яка залежить від швидкості течії рідини.

Здійснити схему двох каналів можна також з використанням однієї пари п'єзоелементів у кожному з яких випромінювання і приймання хвилі виконується по чергово.

Також можлива конструкція за якої напрямок ультразвукової хвилі здійснений перпендикулярно швидкості току течії. В цьому випадку розраховується геометричний зсув хвилі, обумовлений рухом потоку рідини.

Ультразвукові витратоміри складаються з двох основних частин:

- Випромінювачі та приймачі акустичних коливань;
- Електронна схема, через яку здійснюється живлення, генерація ультразвукових коливань, обрахунок сигналів тощо.

Класифікація ультразвукових перетворювачів витрати. Ультразвукові витратоміри поділяються на витратоміри, що базуються на [5]:

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

- залежності швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища;
- вимірюванні залежної від витрати різниці частот, що виникає при відбитті ультразвукової хвилі від неоднорідностей вимірюваного середовища, тобто ефекті Доплера.

Найбільшого розповсюдження набули прилади, що базуються на розрахунку різниці часів проходження акустичних коливань за потоком і проти нього.

В основу ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища першої групи покладено фізичне явище геометричного (векторного) додавання середньої швидкості руху V вимірюваного середовища і швидкості c розповсюдження ультразвукової хвилі у цьому середовищі [3, 4]

$$V_{\Sigma} = V + c.$$

Принципова схема ультразвукового витратоміра (УЗВ) наведена на рис. 1.1.

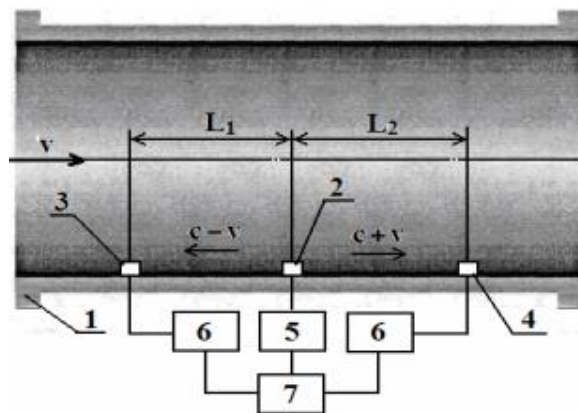


Рис. 1.1 Схема витратоміра з послідовним розташуванням п'єзоелементів

Конструктивно УЗВ являє собою відрізок трубопроводу 1, вздовж якого протікає вимірювана речовина, і в якому розташовані п'єзоелементи 2, 3, 4. Генератор ультразвукових коливань 5 збуджує п'єзоелемент 2. Прийняті п'єзоелементами 3 і 4 сигнали перетворюються та перераховуються пристроями 6 і 7 у різницю між часом розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища [3, 4]

Оскільки симетричність вимірювальної схеми забезпечити складно, застосовують схему з двома п'єзоелементами і комутатором, який по черзі змінює функції п'єзоелементів (випромінювача та приймача).

П'єзоелементи 2, 3 (рис. 1.1) у відрізку трубопроводу 1 можна розташувати під кутом θ до напрямку потоку (рис. 1.2) [6].

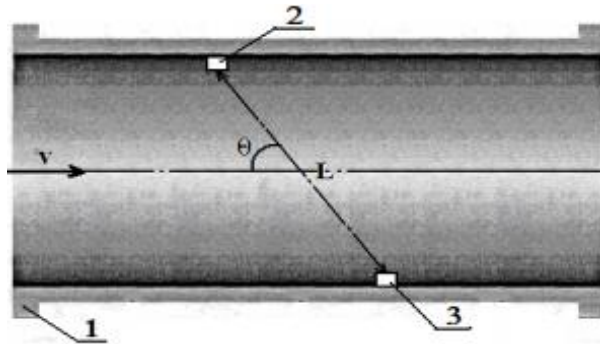


Рис. 1.2 Схема витратоміра з двома п'єзоелементами

Розглянуті вище приклади реалізують так званий час-імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати [4].

У випадку коли вимірюється різниця фаз $\Delta\phi$ прийнятих коливань проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища, отримуємо так званий фазовий ультразвуковий метод вимірювання [6].

Введенням замість різниці часу Δt різниці частот Δf прийнятих коливань, одночасно випромінених двома генераторами проти і вздовж напрямку потоку, отримуємо частотний ультразвуковий метод вимірювання [6].

Ультразвукові витратоміри, що базуються на Доплерівському ефекті, в основному призначені для розрахунку місцевої швидкості, але також знаходять застосування при визначенні витрати. Сутність методу полягає в тому, що у відрізку трубопроводу 1 неперервний сигнал частоти ω_0 з передавача 2, випромінюваний під деяким кутом, відбивається від неоднорідності текучого середовища (пульпа, стічні води тощо) і приймається приймачем 3 як сигнал з частотою ω_d (рис.1.3).

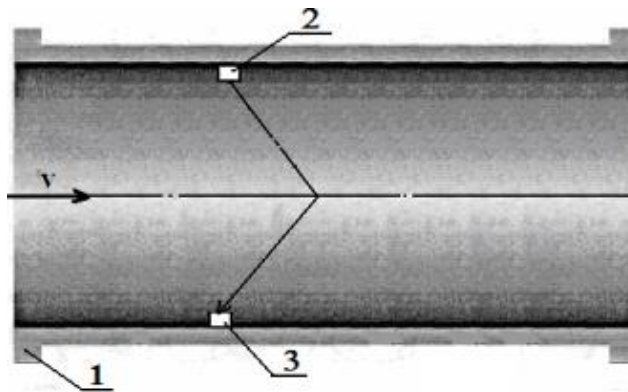


Рис. 1.3 Сутність побудови доплерівського витратоміра

В цьому вигляді можна записати вираз для швидкості розсіювача [6]:

$$V = K \cdot \Delta\omega,$$

де K – коефіцієнт пропорційності, залежний від кута нахилу і частоти випромінюваного сигналу;

$\Delta\omega = \omega_d - \omega_0$ – доплерівський зсув частоти сигналу.

Оскільки текуче середовище налічує деяку випадково розташовану сукупність розсіювачів, мова може йти про сукупність прийнятих частот ω_d тобто деякий «доплерівський спектр».

Існує також ультразвуковий метод визначення витрати текучого середовища, заснований на вимірюванні зсуву ультразвукової хвилі, спрямованої перпендикулярно до напрямку потоку, вимірюваним потоком [3, 4]. Цей зсув залежить від швидкості вимірюваної речовини. Акустичні коливання випромінює один п'єзоелемент, а приймає один або два п'єзоелементи. Такий метод забезпечує достатній рівень чутливості, але точність вимірювання безпосередньо пов'язана зі станом поверхонь трубопроводу, що відбиває випромінювання.

Випромінювачі і приймачі акустичних коливань. Для введення акустичних коливань в потік і для прийому їх на виході з потоку необхідні випромінювачі і приймачі коливань - головні елементи первинних перетворювачів ультразвукових витратомірів.

При стисненні і розтягуванні в певних напрямках деяких кристалів (п'єзоелементів) на їх поверхнях утворюються електричні заряди, і навпаки, якщо до цих поверхонь докласти різницю електричних потенціалів, то п'єзоеле-

мент розтягнеться або стиснеться залежно від того, на якій з поверхонь буде більша напруга. Це явище називається зворотним п'єзоефектом. На ньому ґрунтується робота випромінювачів, що перетворюють змінну електричну напругу в акустичні (механічні) коливання тієї ж частоти. На прямому п'єзоефекті працюють приймачі, що перетворюють акустичні коливання в змінну електричну напругу [3, 4].

Випромінювачі характеризуються п'єзоелектричним модулем (м/В)

$$d = S / E,$$

де E – напруга на п'єзоелементі; S – розмір пружної деформації.

А приймачі – п'єзоконстантою по деформації (В/м)

$$h = E / S$$

Ефективність випромінювача збільшується з зростанням d . Між h і d є залежність

$$h = (E_{\text{Ю}} / \varepsilon \varepsilon_0),$$

де $E_{\text{Ю}}$ – модуль Юнга; ε – діелектрична проникність; ε_0 – електрична константа (електрична проникність вільного простору). Отже зі зростанням п'єзомодулю d зростає і п'єзоконстанта h [3, 4].

Перевагами ультразвукових витратомірів є:

- теоретично необмежений діапазон вимірювань;
- висока точність $\pm (0,5 - 2,5)\%$.
- можливість застосування для трубопроводів великих номінальних діаметрів;
- висока надійність первинного перетворювача, зумовлена відсутністю рухомих частин;
- висока надійність приймально–передавальних елементів;
- можливість безконтактного вимірювання будь–яких текучих середовищ;
- здатність відстежувати швидкі зміни швидкості потоку, що забезпечує можливість вимірювання витрат потоків з частотою пульсацій до 10 кГц;

- відсутність викривлень потоку вимірюваного середовища та втрати тиску, зумовлених відсутністю виступаючих елементів у вимірювальному каналі;
- стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу;
- висока чутливість, яка може забезпечити основну приведену похибку, що не перевершує десятих часток проценту при умові індивідуального градуювання;
- можливість вимірювання реверсивних потоків;
- можливість визначення додаткових параметрів потоку (густини, швидкості звуку, тощо).

Слід відмітити, що оскільки чутливість ультразвукових витратомірів залежить від відношення V/c , то можна вважати, що ці засоби вимірювальної техніки більш придатні до вимірювання витрати газів, але акустичний опір газів невеликий, тому ультразвуковим коливанням важко передати енергію, необхідну для переносу хвилі від випромінювача до приймача.

Структурна складність у всіх методів приблизно однакова, тому серед усіх розглянутих методів для вимірювання витрати найкраще підходить час-імпульсний метод вимірювання, оскільки він використовує самі прості сигнали (один зондуючий імпульс), не вимагає реалізації складної структури випромінюваного акустичного сигналу (паузи в випромінюваних пакетах хвиль, частоти) і дозволяє досягати порівняно високих показників точності і широкого діапазону вимірюваних значень.

1.2 Розробка схеми вимірювання

Методи вимірювань витрати ТС базуються на перетворенні енергії потоку в інші види енергії, більш зручні для вимірювань, або в електричний сигнал. Тому структуру витратоміра можна подати як сукупність первинного перетворювача (ПП), вимірювального блоку (ВБ) та відлікового

пристрою (ВП) (Рис. 1.4). Функції ВБ і ВП можуть бути об'єднані у структурі обчислювального пристрою (ОП).

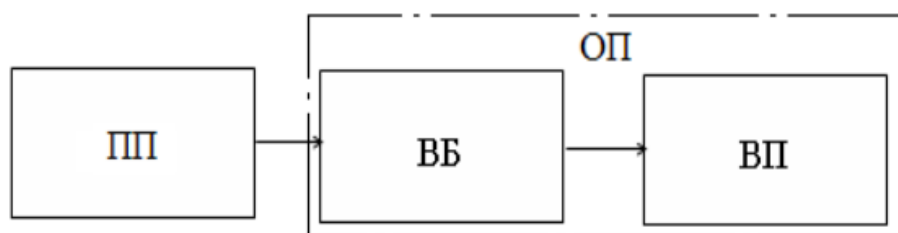


Рис. 1.4 Спрощена структурна схема витратоміра

Принцип вимірювання швидкості потоку рідини пояснюється на рис. 1.5.

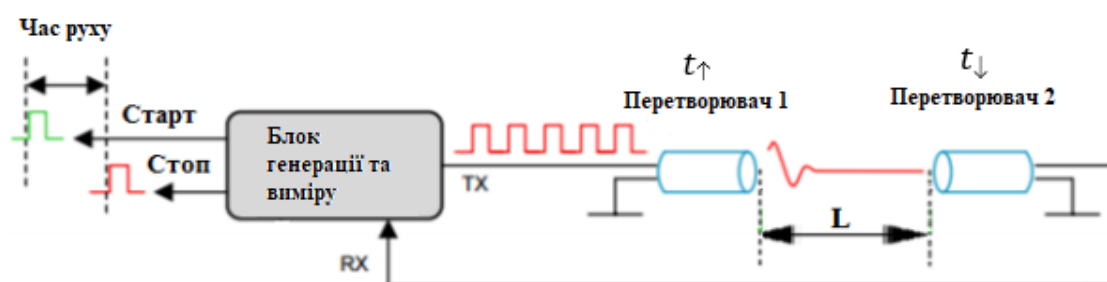


Рис.1.5 Схема для розрахунку швидкості потоку, де: L – відстань між сенсорами; t_{\uparrow} , t_{\downarrow} - відповідно час проходження ультразвуку за і проти потоку; R_x – зворотній зв'язок; T_x – прямий зв'язок.

Розробка структурної схеми. Принцип дії ПП витратоміра базується на тому, що час, за який звуковий сигнал проходить визначену відстань в потоці рідини, залежить від швидкості її течії. Отже, вимірюючи час проходження звукового сигналу за потоком і проти нього, і обробивши його визначеним чином, можна отримати інформацію про швидкість, і обробивши сигнал, за визначених умов, можна отримати інформацію про витрату [5].

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і більше), створювані електроакустичним вібратором (випромінювачем) В1, проходять крізь середовище, що протікає трубопроводом, та реєструються приймачем П1, що відстає від випромінювача на відстань L (рис. 1.6).

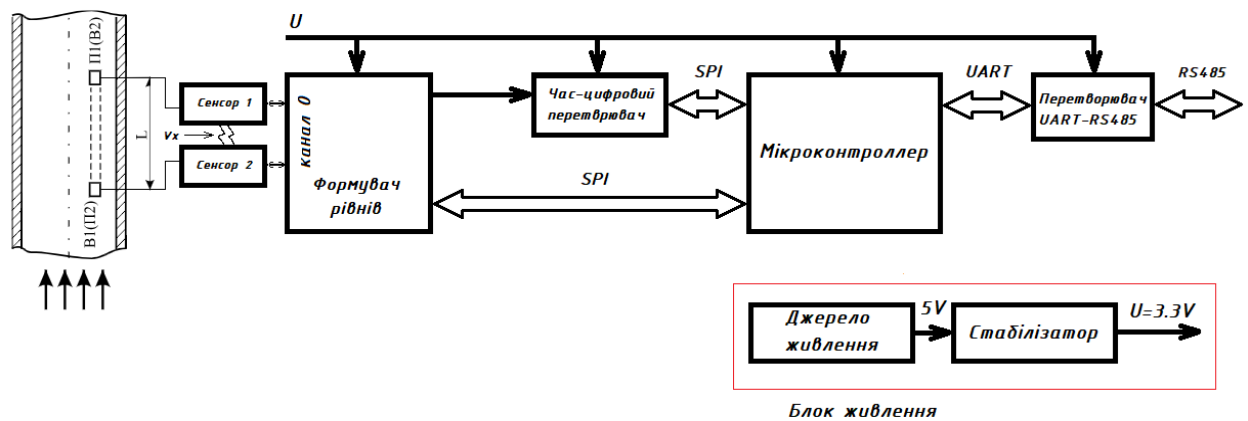


Рис. 1.6 Структурна схема ультразвукового витратоміра

Напруга в 5В на виході джерела живлення стабілізується до рівня в 3.3В. Цією напругою здійснюється живлення всієї вимірювальної системи. Пристрій для формування рівнів, час-цифровий перетворювач і мікроконтролер з'єднані між собою інтерфейсом SPI, по якому здійснюється управління і налаштування. Як інтерфейс верхнього рівня використовується RS485.

SPI — фактичний послідовний синхронний повнодуплексний стандарт передачі даних, розроблений фірмою Motorola для забезпечення простого сполучення мікроконтролерів та периферії. SPI також називають чотирьох-провідним інтерфейсом. На відміну від стандартного послідовного порту, SPI є синхронним інтерфейсом, в якому кожна передача синхронізована з тактовим сигналом, що генерується ведучим пристроєм (мікроконтролером). Периферійний пристрій синхронізує отримання бітової послідовності з тактовим сигналом. До одного послідовного периферійного інтерфейсу ведучого мікроконтролера можна під'єднати декілька мікросхем.

Вимірювання кожної з трьох проекцій швидкості течії здійснюється в два етапи. На першому етапі ультразвуковий сигнал поширюється від передавача до приймача. На другому етапі приймач і передавач змінюються своєю функціональністю і ультразвуковий сигнал поширюється у зворотному напрямку.

В ході першого етапу мікроконтролер відправляє повідомлення про запуск

по інтерфейсу SPI на TDC7200 [7], який в свою чергу відправляє стартовий сигнал для TDC1000 [8], який запускає вимірювання часу поширення ультразвукового сигналу в середовищі. Почавши вимірювання тривалості, TDC1000 [8] разом з тим відправляє пусковий імпульс в TDC7200 [7], який формує сигнал напруги для першого ультразвукового датчика (через лінію TX1). Ехо-сигнал з приймача формується на лінії RX1. Поступив в TDC1000 [8] сигнал електричного струму з ультразвукового приймача посилюється і передається на компаратор для генерації стоп-імпульсу, що сигналізує про закінчення вимірювання часу поширення. Отримані результати заносяться в регістри TDC7200 [7], звідки зчитуються і передаються в мікроконтролер по інтерфейсу SPI для подальшої обробки.

В ході другого етапу вимірювання проекції швидкості течії процедура повторюється. Відмінність полягає лише в тому, що сигнал на формування ультразвукового імпульсу передається по лінії TX2, а ехо-сигнал зчитується по лінії RX2. За різницею часу, витраченого ультразвуком на поширення за течією і проти неї, мікроконтролер визначає значення проекції швидкості течії на вісь, на якій розташовані приймач і передавач.

Вибір формувача рівнів. При вимірюванні витрати безконтактними методами залежно від ступеня забруднення рідини застосовують акустичні випромінювачі з різними частотами в діапазоні від 0,1 до 10 МГц [5]. Для підтримки таких випромінювачів був обраний інтегрований аналоговий формувач рівнів TDC1000 [8] від Texas Instruments, за допомогою якого можна випромінювати імпульси на різних частотах (від 31, 25 кГц до 4 МГц). Він має два канали прийому передачі ультразвукового сигналу і може бути оптимізований для низького енергоспоживання.

У додатку з високими вимогами до точності виробник рекомендує використовувати TDC1000 [8] в поєднанні з час - цифровим перетворювачем TDC 7200 [7]. Також до даної мікросхеми можна підключити два резистивних датчика температури на основі термоперетворювачів Pt 500 для уточнення швидкості звуку в середовищі. Для управління параметрами мікросхем

використовується SPI-інтерфейс, через який можна задати частоту збуджуючих імпульсів передавача, їх амплітуду і форму сигналу.

Вибір час-цифрового перетворювача. Незважаючи на рекомендацію Texas Instrument використовувати TDC1000 [8] разом з TDC7200 [7], розглянемо і інші перетворювачі час-цифровий код і виберемо серед них найкращий за характеристиками. Для вибору перетворювача в таблиці 1.1. Поряд з «Texas Instruments» були розглянуті перетворювачі від таких виробників, як «Maxim Semiconductor» і «Acam». Час-цифровий перетворювач вибирався за двома параметрами: напругою живлення і точністю.

Таблиця 1.1 Час-цифрові перетворювачі

Назва	TDC7200 [7]	MAX 35101 [9]	Acam TDC-GP22 [10]
Границя похибки, пс	$T_{ACCTYP} = 28$	$T_{ACCTYP} = 30$	$T_{ACC TYP} = 45$
Діапазон вимірів, нс	8	8	8
Напруга, В	2 – 3,6	2,3 – 3,6	2,5 – 3,6
Сила току, мА	1,35	2,2	2,3
Інтерфейс	SPI	SPI	SPI

Усі представлені в таблиці перетворювачі мали відповідну вихідну напругу, тому був обраний перетворювач з найменшою межею абсолютної похибки, яким виявився перетворювач від Texas Instruments TDC7200PW [7]. Основною функцією перетворювача є фіксація і вимірювання часу. У TDC7200PW реалізована можливість вимірювати до п'яти тимчасових інтервалів між початковою і кінцевою мітками часу. Пікосекундна точність вимірювання, що досягається за рахунок внутрішнього самокалібрування перетворювача, підходить для витратомірів, в яких необхідно вимірювати малі швидкості потоків рідини з високою точністю. Спільне використання TDC1000 і TDC7200 дає змогу реалізувати систему з малим споживанням, високою точністю і хорошою повторюваністю параметрів.

Вибір мікроконтролера. Для обробки і розрахунку даних, що надходять з час-цифрового перетворювача і формувача рівнів, а також для контролю режимів роботи вимірювальної системи необхідно використовувати мікроконтролер. Мікроконтролер повинен відповідати таким вимогам:

- повинен мати SPI інтерфейс для зв'язку з формувачем рівнів і час-цифровим перетворювачем;
- повинен мати достатню кількість портів введення-виведення для підключення трьох вимірювальних каналів;
- мікроконтролер, який має найменше споживання.

Нижче в табл. 1.2 наведені типові серійні мікроконтролери.

Таблиця 1.2 Мікроконтролери

Назва	MSP430F552 [11]	ATmega168 [12]	C8051F350 [13]
Напруга живл., В	3,3	3,3	3,3
Сила струму, мА	$A_{M, FLASH\ TYP} = 3,10\text{ мА на } 8\text{ МГц}$ $I_{AM, RAM\ TYP} = 1,60\text{ мА на } 8\text{ МГц}$	$I_{cc} = 3,4\text{ мА на } 8\text{ МГц}$	$I_{cc} = 13,6\text{ мА на } 25\text{ МГц}$
К-сть портів	64	24	32
ПЗУ, Кб	16	16	8
ОЗУ, Б	512	1024	768
Тактова частота, МГц	16	16	50
Останній порт	I2C, SPI, UART	ICSP-порт, SPI	I2C, SPI, UART

Найбільш підходящим мікроконтролером є модель MSP430F552 [11]. Він має інтерфейс SPI і 64 порти введення і виведення. До переваг MSP430F552 [11] можна віднести наднизьке споживання енергії, швидкий старт, більшу флеш-пам'ять з можливістю програмування безпосередньо всередині схеми.

1.3 Розробка математичної моделі витратоміра

Якщо v – швидкість потоку вимірюваного середовища, а c – швидкість звуку в цьому середовищі, то тривалість розповсюдження звукової хвилі за напрямом руху потоку від випромінювача до приймача [3, 4]

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v}. \quad (1.1)$$

Тривалість розповсюдження звукової хвилі проти потоку від випромінювача до приймача визначається аналогічно [3, 4]

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v}. \quad (1.2)$$

На основі (1.1) та (1.2) визначимо $\tau_2 - \tau_1$, що вимірюється електронно-лічильною схемою [3, 4]

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (1.3)$$

Знайдемо залежність між $\Delta\tau$ (1.3) та витратою Q . Виразимо швидкість потоку вимірюваного середовища через витрату, оскільки v^2/c^2 набагато менше за одиницю, то маємо [3, 4]

$$\Delta\tau = \varphi \frac{2L}{Fc^2} Q, \quad (1.4)$$

де F – площа живого перерізу потоку, φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкості за перерізом потоку.

Закон розподілу швидкостей при ламінарному режимі руху рідини.
При ламінарному режимі руху рідини в трубопроводі, в ньому виникають сили тертя і рідина починає рухатися циліндричними нескінченно тонкими шарами з різними швидкостями. Швидкості шарів рідини від осі трубопроводу до її стінок зменшуються за параболічним законом. На осі трубопроводу швидкість потоку максимальна. На поверхні стінок труби швидкість течії дорівнює нулю. Шари рідини, що рухаються з меншою швидкістю, гальмують рух шарів, що

мають більшу швидкість. Циліндричні шари рідини, що рухаються з більшою швидкістю, ковзають по шарах рідини, що рухається з меншою швидкістю. На поверхнях суміжних шарів рідини завдяки наявності зчеплення частинок рідини між собою та зі стінками, які огорожують потік, в процесі ковзання розвиваються сили тертя. Сили тертя, що з'явилися між шарами рідини, виконують гальмівну дію, що і призводить до виникнення різних швидкостей руху окремих частинок рідини [14].

Головною причиною виникнення сил тертя при русі потоку вважають різницю швидкостей між рухомими шарами рідини. Чим більше різниця швидкостей, тим більше за величиною виникають сили тертя, сили гідравлічних опорів.

Розглянемо ламінарний режим руху в циліндричній трубі (рис. 1.7). У моделі такий рух можна представити як безліч телескопічних висунутих циліндрів товщиною dr . Криву цих циліндрів можна розглядати як епюру швидкостей струменів.

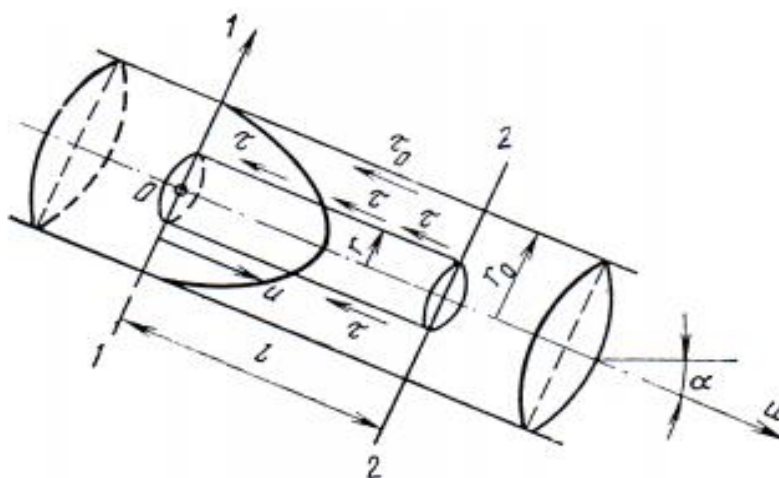


Рис. 1.7 Епюра швидкостей при ламінарному режимі руху рідини

Дотичне напруження τ на бічній поверхні виділеного циліндра визначимо відповідно до закону Ньютона про силу опору в рідині [14], а саме

$$\tau = \mu \frac{du}{dn}.$$

При направленості осей u та n , вказаних на рис. 1.7 – вісь швидкості u в напрямку осі трубопроводу, вісь нормалі до напрямку швидкості – уздовж радіусу r , тоді можемо записати

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr}. \quad (1.5)$$

Знак мінус, тому що при $dr > 0$ маємо $du < 0$

Після підстановки в рівняння рівномірного руху (1.5) отримаємо диференціальне рівняння розподілу швидкості у такому вигляді

$$-\mu \frac{du}{dr} = \rho g \frac{r h_w}{2l}. \quad (1.6)$$

Після інтегрування рівняння (1.6) отримаємо

$$-u = \frac{\rho g h_w}{2\mu l} \int r dr = \frac{\rho g h_w}{4\mu l} r^2 + C. \quad (1.7)$$

Визначимо постійну інтегрування C за граничними умовами. В точці біля стінки трубопроводу $r = r_0$, тобто радіусу труби, а швидкість $u = 0$. Тоді отримаємо

$$0 = \frac{\rho g h_w}{4\mu l} r_0^2 + C \text{ та } C = -\frac{\rho g h_w}{4\mu l} r_0^2. \quad (1.8)$$

Відповідно після підстановки (1.8) рівняння (1.7) набуде вигляду

$$u = \frac{\rho g h_w}{4\mu l} (r_0^2 - r^2)$$

Тоді для витрати рідини можна записати

$$Q = \int_S u dS = \frac{\rho g h_w}{4\mu l} 2\pi \int_0^{r_0} (r_0^2 - r^2) r dr = \frac{\rho g h_w}{4\mu l} 2\pi \left(\frac{r_0^4}{2} - \frac{r_0^4}{4} \right) = \frac{\rho g h_w}{8\mu l} \pi r_0^4 \quad (1.9)$$

Розділивши (1.9) на πr_0^2 , знайдемо середню швидкість

$$v = \frac{\int_S u dS}{\pi r_0^2} = \frac{\rho g h_w}{8\mu l} r_0^2. \quad (1.10)$$

З рівняння (1.10) виходить, що середня швидкість потоку дорівнює половині максимальної [14].

Закон розподілу швидкості при турбулентному режимі руху рідини.
Турбулентний стан потоку характеризується безперервним перемішуванням безлічі дрібних вихрових утворень, що виникають і переміщуються всередині потоку.

Вихрові утворення виникають через в'язкість рідини. На поверхні контакту рідини і твердих стінок молекули рідини і молекули твердих стінок знаходяться на відстані їх силової взаємодії. У зв'язку з цим частки рідини затримуються біля стінок, і їх швидкість дорівнює нулю. Сусідні з ними частки починають рухатися, і їх швидкість зростає з віддаленням від стінок. При цьому виникає обертальний рух окремих мас рідини.

Складання двох рухів, поступального і обертального, збуджує силу, прикладену до частки і спрямовану нормально до осі швидкості потоку (ефект Магнуса). Під дією цієї сили частки рідини переміщуються до центру потоку, утворюючи процес перемішування. Наявність шорсткості стінок сприяє такому перемішуванню і в деяких випадках може виявитися навіть головною причиною явища. Цей процес, очевидно, можливий при досить великих швидкостях течії, при яких стабілізуючий вплив в'язкості не може перешкодити такому перемішуванню. Відомо, що турбулентний рух виникає при швидкостях більше $v_{кр}$ (коли число Рейнольдса більше $Re > 2300$) [14].

Процес перемішування зумовлює виникнення пульсації швидкостей, тобто така зміна її величини в даній точці, за якої відхилення від деякої середньої відбуваються в обидва боки. Пояснюється це тим, що через дану точку простору послідовно проходять різні частки рідини з різними швидкостями як за величиною, так і за напрямком [14].

Зазвичай найбільша увага приділяється явищу пульсації поздовжньої швидкості u_x , яка вимірюється в точці поперечного перерізу за допомогою різних гідрометричних приладів.

У зв'язку з явищем пульсації турбулентний рух є несталим, і в будь-який

момент часу має місце миттєве поле швидкостей (і інших кінематичних параметрів потоку). Чим більше проміжок часу усереднення, тим точніше визначається середня швидкість потоку. Визначена таким чином швидкість називається усередненою швидкістю в даній точці [14].

Зв'язок між миттєвою та усередненою швидкостями визначається як

$$u_x = \overline{u_x} + u'_x ,$$

де u_x , $\overline{u_x}$, u'_x – відповідно миттєва, усереднена і пульсаційна складові швидкості

Процес перемішування викликає перенесення кількості руху з області малих швидкостей потоку в область великих швидкостей і назад. Очевидно, маси з малими швидкостями при вході в область течій з великими швидкостями будуть гальмувати рух в цій області, тобто чинити силовий опір руху. Це будуть сили інерції, отже, фізична природа турбулентних опорів - інерційна. Маса рідини з великими швидкостями, чинячи тиск на приєднані маси, прискорює їх рух і витрачає при цьому свою енергію (при цьому прискоренні виникають сили інерції) [14].

Біля стін трубопроводу швидкості приймаються нульовими, до центру (осі труби) вони поступово збільшуються, тобто біля стінок труби створюється ламінарний шар невеликої товщини, за межами якого розташовується центральна, основна частина потоку - турбулентне ядро. У зв'язку з малими швидкостями течії в ламінарному шарі швидкості швидко наростають, градієнт швидкості тут великий, і його можна наближено вважати величиною постійною. У межах центрального ядра турбулентний плин і зміна швидкостей відбуваються не так інтенсивно. Ілюстрація такої схеми показана на рис. 1.8.

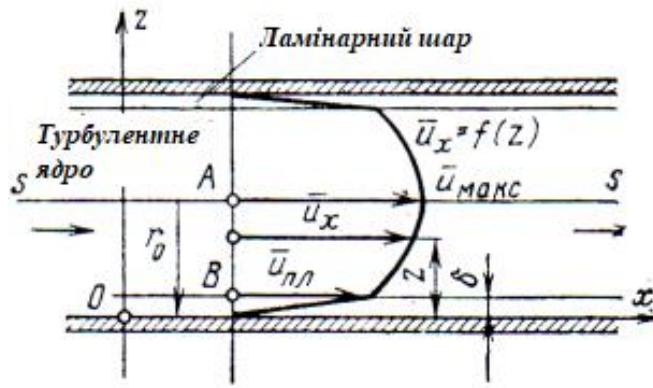


Рис. 1.8 Епюра швидкостей при турбулентному русі рідини

Для ламінарного режиму дотичні навантаження визначаються за формулою Ньютона [14]

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy}.$$

При турбулентному режимі руху [14]

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy} + \rho l^2 \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2, \quad (1.11)$$

де l – шлях перемішування

За даними досліджень Г.А. Гуржієнко, поблизу стінок трубопроводу залежність l від y є лінійною, тому можна написати [14]

$$l = ky,$$

де k – коефіцієнт пропорційності, так звана універсальна стала.

По Г.А. Гуржієнко $k = 0,435$. З цього виходить, що $l = 0,435y$. Перша складова $\mu \frac{du_x}{dy}$ характеризує в'язке тертя яке відповідає силам тертя в ламінарному русі. Друга складова $\rho l^2 \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2$ показує додаткове дотичне напруження від пульсації, що виникає в турбулентному потоці через наявність поперечного руху окремих частинок рідини. Зі збільшенням швидкості течії (числа Рейнольдса) головний вплив на величину дотичних напружень надає друга складова рівняння (1.11) і при великих числах Рейнольдса дотичні напруження дорівнюють квадрату градієнта швидкості [14].

Завдяки пульсації в турбулентному потоці рідини закон розподілу швидкостей по живому перерізу відрізняється від ламінарного. При турбулентному русі відбувається вирівнювання швидкостей по перерізу. Для розвиненого турбулентного режиму руху, через її малу масу, що бере участь в граничному шарі, перший доданок правої частини рівняння (1.11) порівняно з другим є малою величиною, тому ним можна знехтувати. Тоді рівняння (1.11) буде мати вигляд

$$\tau_0 = \rho l^2 \left(\frac{du_x}{dy} \right)^2 ;$$

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = l \frac{du_x}{dy} . \quad (1.12)$$

Якщо підставити значення $l = ky$ в формулу (1.12) і позначивши $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_d$, отримаємо

$$du_x = \frac{u_d}{ky} dy , \quad (1.13)$$

де u_d – динамічна швидкість

Якщо прийняти $u_d = const$, тоді після інтегрування диференціального рівняння (1.13) отримаємо логарифмічний закон розподілу швидкостей по перерізу для турбулентного потоку

$$u_x = \frac{u_d}{k} \ln y + C .$$

Маючи на увазі, що при $|y = y_0|$ швидкість в центрі труби максимальна (u_{max}), визначимо постійну інтегрування C . При $|k = 0,435|$ аналітичний вираз, який характеризує закон розподілу швидкості по перерізу труби набуде вигляду

$$\frac{u_{max} - u_x}{u_d} = 5,3 \ln \frac{r_0}{y} .$$

1.4 Розрахунок конструктивних елементів витратоміру

У даному розділі нам знадобиться промодельовати потік води в витратомірі для того, щоб побачити як рухається потік та щоб отримати графіки розподілу швидкості та перепаду тиску.

Моделювання течії води у витратомірі в CAD/CAE SolidWorks. SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation, САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення. SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу. Також можливе отримання графічних відображень фізичних процесів у виробі [15].

Для того, щоб отримати вихідні графіки, нам знадобиться змодельовати рух потоку води в ультразвуковому витратомірі (вимірюється перепад тиску, швидкість руху).

Побудова деталей та конструкції спрощеної моделі ультразвукового витратоміра. Для дослідження будуємо спрощену 3D модель ультразвукового витратоміра. Побудову моделі витратоміра починаємо з моделювання всіх деталей. Вихідними даними для моделювання є геометричні розміри деталей та фізичні властивості потоку.

Першим проектуємо корпус (Рис. 1.9). Саме він задає основну поведінку потоку, оскільки всередині корпусу знаходиться гідравлічний канал не звичайної форми (Рис. 1.10), по якому проходить рідина.

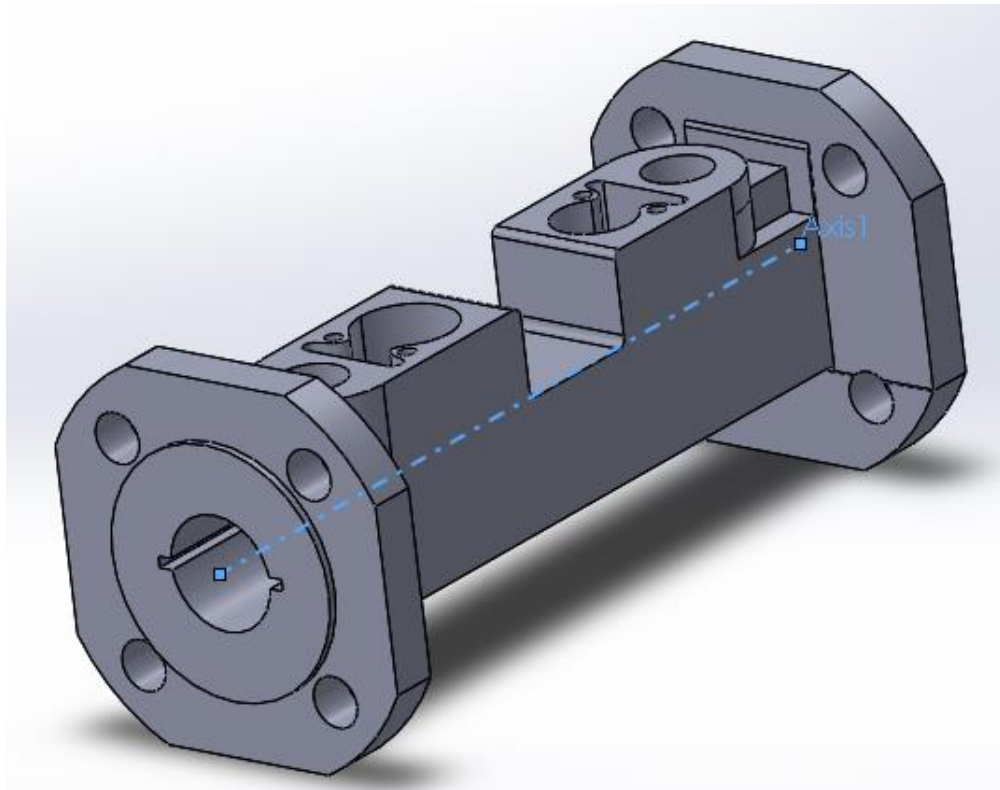


Рис. 1.9 Корпус.

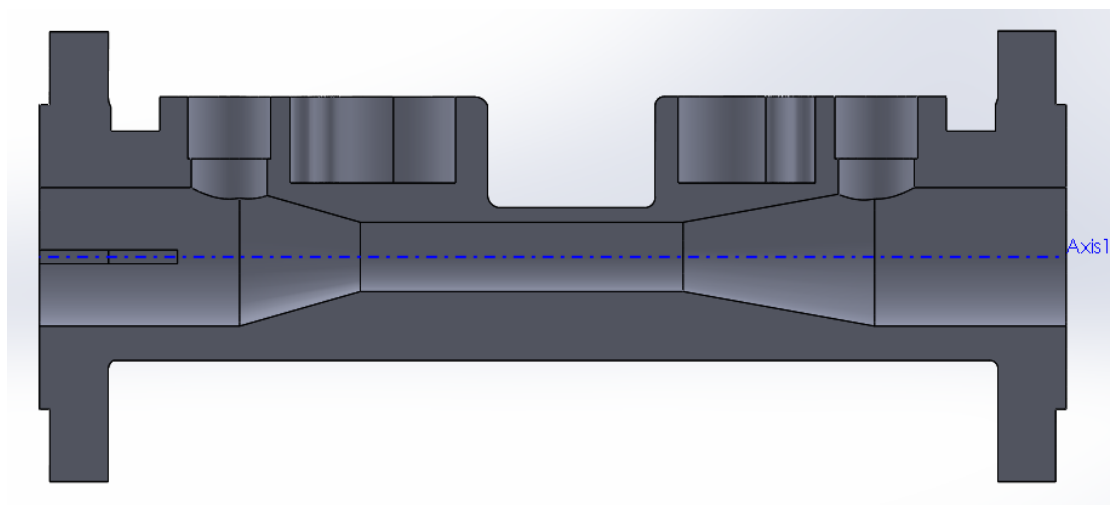


Рис. 1.10 Зображення гідравлічного каналу.

Далі переходимо до проектування спрощеної моделі сенсора (Рис. 1.11), який розташовується на супротив потоку. Він чинить опір потоку рідини, саме тому змінюється швидкість потоку рідини на ділянці, де розташований сенсор. Далі нам потрібно сконструювати турбулізатор (Рис. 1.12), прискорює потік.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ ПІ5113.000 ПЗ

Аркуш

27

І на кінець, для моделювання потоку нам знадобляться дві заглушки (Рис. 1.13), які зможуть замкнути систему моделювання проливу.

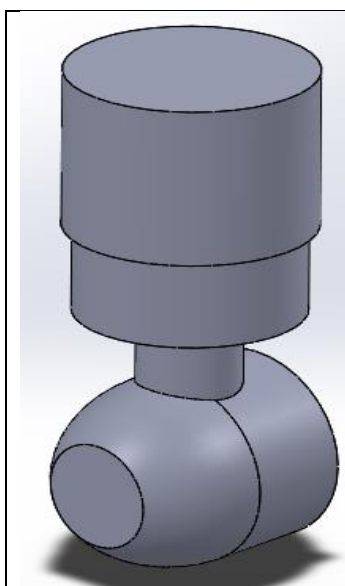


Рис. 11 Сенсор

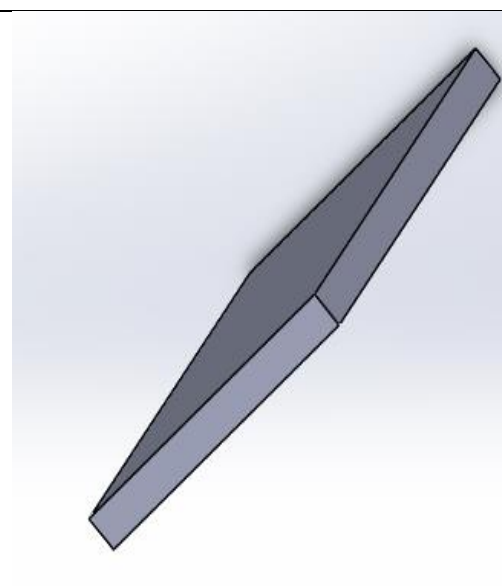


Рис. Турбулізатор

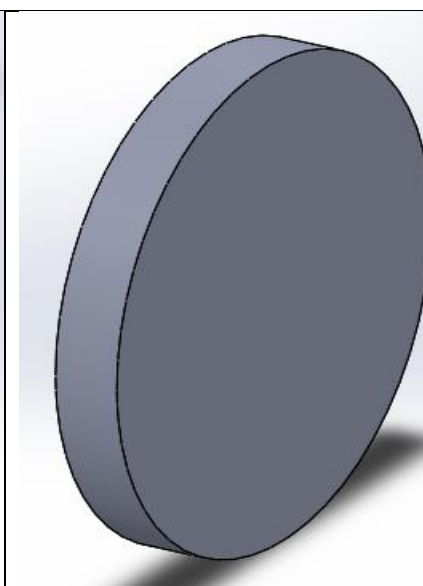


Рис. 1.13 Заглушка

Загалом, вже на цьому етапі можна складати спрощену 3D модель ультразвукового витратоміра (Рис. 1.14) і проводити моделювання плинину рідини через нього.

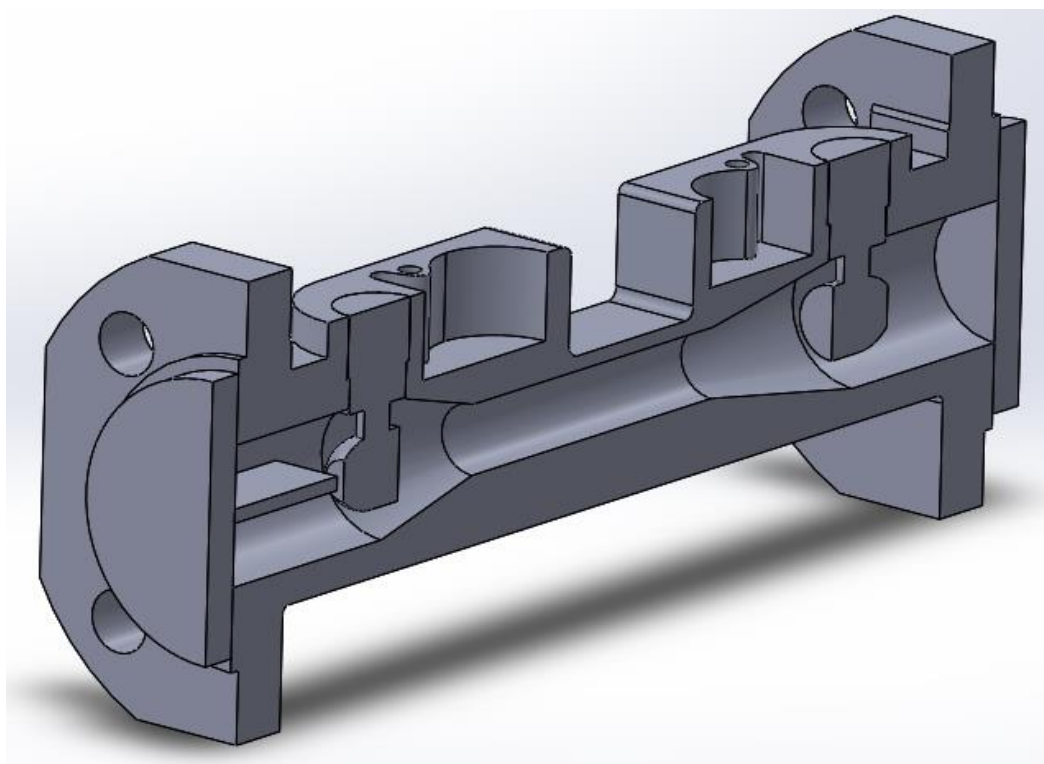


Рис. 1.14 Спрощена 3D модель ультразвукового витратоміра

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ ПІ5113.000 ПЗ

Аркуш

28

Дослідження процесу руху рідини в моделі витратоміра. Для того щоб розпочати дослідження процесів необхідно задати початкові умови. Ця інформація задається по кроках командами програми моделювання Flow Simulation – Wizard. В спливаючому вікні на двох вкладках потрібно вибрати (Рис. 1.15):

- Систему одиниць СІ;
- Тип рідини – вода.

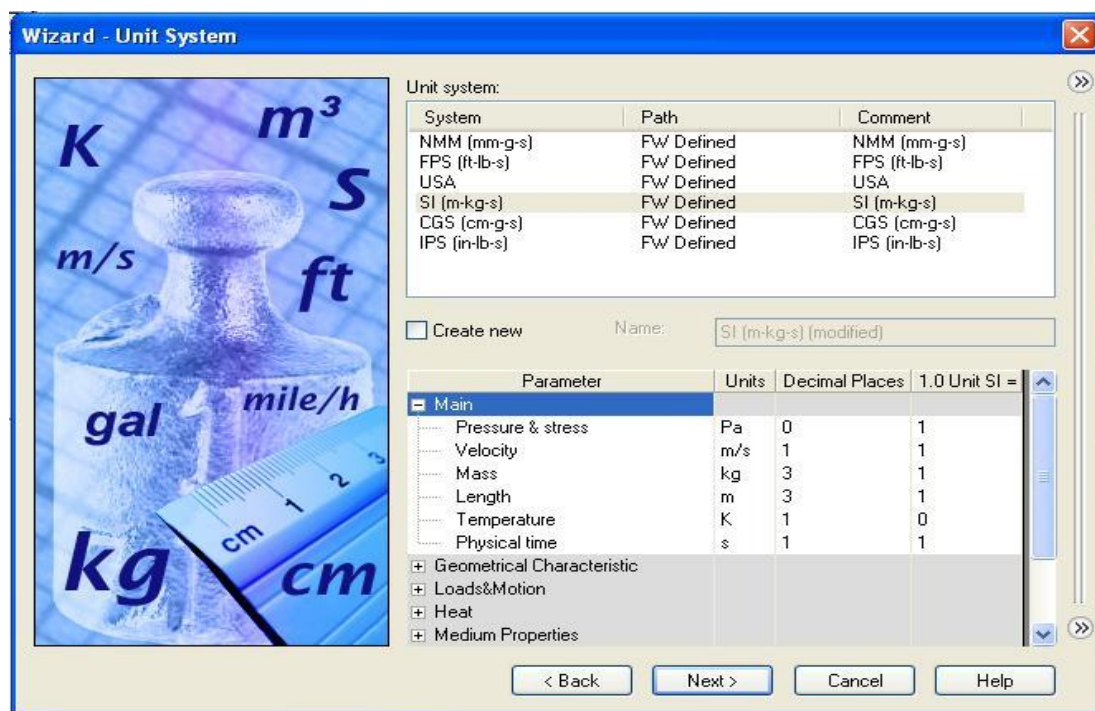


Рис. 1.15 Спливаюче вікно

Решту параметрів залишаємо без змін. Тепер запускаємо розрахунок проливу рідини через систему кнопкою Run.

Після формування проекту експерименту задаємо наступні граничні умови згідно вхідних даних:

1. витрату на вході в камеру $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год} = 0,000278 \text{ м}^3/\text{с}$ (Inlet Velocity 1);
2. атмосферний тиск на виході із камери $P = 101325 \text{ Па}$ (Environment Pressure 1);

Всі данні вводяться в вкладці “Boundary Conditions” в лівому головному меню вхідних даних та границь (рис. 1.16).

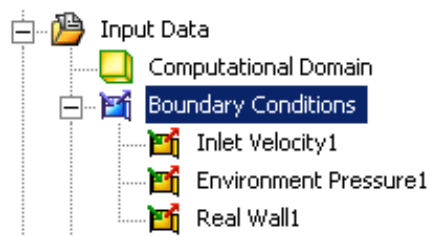


Рис. 1.16 Меню вхідних даних

Для зручності перегляду результатів експерименту проводимо переріз по осі витратоміра. Графіки розподілу параметрів, що характеризують фізичний процес проходження рідини через витратомір будуємо на січних площинах.

На рис. 1.17 представлено діаграму розподілу швидкості плинун води.

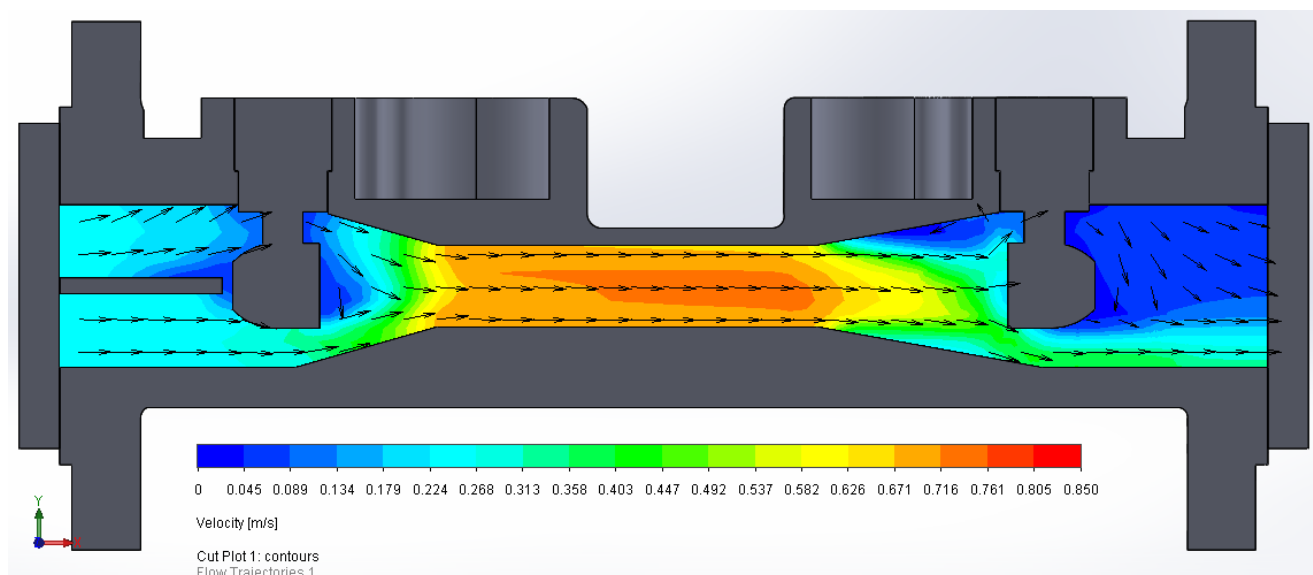


Рис. 1.17 Графік розподілу швидкості води за витрати $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год}$

Як видно з графіку (1.17), максимальна швидкість потоку $V_{max} \sim 0,8 \text{ м/с}$. Це значення буде потрібно для розрахунку статичної характеристики у наступному розділі.

Розрахунок товщини стінок корпусу. Корпус ультразвукового витратоміра містить гідравлічний канал з різними діаметрами на деяких ділянках. Тоді за законом збереження енергії найбільший тиск в гідравлічному каналі буде властивий ділянці з найбільшим діаметром живого перерізу, тобто на вході або на виході гідравлічного каналу, оскільки в обох випадках діаметр

живого перерізу $D = 40 \cdot 10^{-3}$ м. Тому розрахунок товщини стінки слід проводити саме на цій ділянці, адже найбільший тиск на стінку буде саме тут .

Корпус у цій ділянці представляє собою кільцевий циліндр із внутрішнім радіусом r_1 та зовнішнім радіусом r_2 , тоді визначити товщину його стінок можна як для циліндра, навантаженого внутрішнім тиском P_1 та зовнішнім тиском P_2 . [16]

Вихідними даними для розв'язку цієї задачі є: внутрішній діаметр циліндра; внутрішній тиск; зовнішній тиск; допустиме напруження.

Циліндр слід вважати товстостінним, якщо товщина його стінки більше за одну десяту середнього радіуса циліндра ($0,1r_{\text{КСР}}$). Для товстостінних циліндрів не можна припускати, що в окружному напрямі напруги постійні за товщиною стінки, а в радіальному напрямі взагалі відсутні.

В загальному випадку для циліндра навантаженого внутрішнім P_1 та зовнішнім P_2 тиском визначають нормальні напруження σ_r та σ_θ [16]:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}; \quad (1.14)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - P_2)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}; \quad (1.15)$$

де σ_r – нормальні напруження (радіальні напруження) на циліндричній поверхні елемента радіусом r ; σ_θ – нормальні напруження на плоских гранях (тангенціальні або окружні напруження).

Товщина стінки корпусу характеризується величиною відношення внутрішнього радіусу до зовнішнього $k = r_1/r_2$.

Із врахуванням величини k вирази (1.14) та (1.15) для визначення нормальних напруг набувають виду [16]

$$\sigma_r = \frac{k^2 P_1 - P_2}{1 - k^2} - \frac{(P_1 - P_2) r_1^2}{1 - k^2} \frac{1}{r^2}; \quad (1.16)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{k^2 P_1 - P_2}{1 - k^2} + \frac{(P_1 - P_2) r_1^2}{1 - k^2} \frac{1}{r^2}. \quad (1.17)$$

Для визначення товщини стінок корпусу досліджуваного ультразвукового витратоміра необхідно розв'язати задачу, коли на циліндр діє тільки внутрішній тиск, а зовнішній тиск відсутній або настільки малий, що їм можна знехтувати, тобто $P_1 = P$; $P_2 = 0$ [16].

Вихідними даними для цієї задачі є:

- внутрішній діаметр циліндра $d = 40 \cdot 10^{-3}$ м;
- внутрішній тиск 2,5 МПа;
- допустиме напруження $\sigma = 30$ МПа для чугуна СЧ20

В даному випадку вирази (1.16) та (1.17) набувають виду:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) P; \quad (1.18)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) P. \quad (1.19)$$

Напруження σ_r – таке, що стискає, σ_{θ} – таке, що розтягує. Найбільших значень σ_r та σ_{θ} набувають біля внутрішньої поверхні циліндра. Якщо $r = r_1$, то:

$$(\sigma_r)_{r=r_1} = -P;$$

$$(\sigma_{\theta})_{r=r_1} = \frac{1 + k^2}{1 - k^2} P,$$

де $k = \frac{r_1}{r_2}$.

Напруження біля зовнішньої поверхні мають такі значення [16]:

$$(\sigma_r)_{r=r_2} = 0;$$

$$(\sigma_{\theta})_{r=r_2} = \frac{2k^2}{1 - k^2} P.$$

Найбільш небезпечними з точки зору міцності є точки, що знаходиться біля внутрішньої поверхні циліндра. Визначимо головні напруження в цих точках [16]:

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_\theta &= \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P = \frac{1 + k^2}{1 - k^2} P; \\ \sigma_2 = \sigma_z &= 0; \\ \sigma_3 = \sigma_r &= -P.\end{aligned}\tag{1.20}$$

Умова міцності за четвертою теорією [16]

$$\sigma_{\text{еквIV}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \leq [\sigma]\tag{1.21}$$

Після підстановки виразів (1.20), рівняння (1.21) набуває такого виду

$$\sigma_{\text{еквIV}} = \sqrt{\sigma_\theta^2 - \sigma_\theta \sigma_r + \sigma_r^2} \leq [\sigma]$$

або

$$\sigma_{\text{еквIV}} = \sqrt{\left(\frac{1 + k^2}{1 - k^2} P\right)^2 + \frac{1 + k^2}{1 - k^2} P^2 + P^2} \leq [\sigma].\tag{1.22}$$

З рівняння (1.22) маємо:

$$([\sigma]^2 - P^2)k^4 - 2[\sigma]^2 k^2 + ([\sigma]^2 - 3P^2) = 0.\tag{1.23}$$

Розв'язуючи рівняння (1.23) відносно k^2 , отримаємо

$$k = \frac{\left(\frac{[\sigma]}{P}\right)^2 \mp \sqrt{\left(\frac{2[\sigma]}{P}\right)^2 - 3}}{\left(\frac{[\sigma]}{P}\right)^2 - 1}.$$

Оскільки $k^2 < 1$, то обираємо корінь зі знаком „мінус”

$$k = \frac{\sqrt{\left(\frac{[\sigma]}{P}\right)^2 - \sqrt{\left(\frac{2[\sigma]}{P}\right)^2 - 3}}}{\sqrt{\left(\frac{[\sigma]}{P}\right)^2 - 1}}. \quad (1.24)$$

Отже, підставивши значення в формулу (1.24) отримуємо

$$k = \frac{\sqrt{\left(\frac{30000000}{2500000}\right)^2 - \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 30000000}{2500000}\right)^2 - 3}}}{\sqrt{\left(\frac{30000000}{2500000}\right)^2 - 1}} = 0,84.$$

Тоді використовуючи параметр k , знайдемо зовнішній радіус циліндра r_2 :

$$r_2 = \frac{r_1}{k} = \frac{20}{0,84} = 23,8 \text{ (мм)}.$$

а товщина стінок h корпусу в свою чергу дорівнює:

$$h = r_2 - r_1 = 23,8 - 20 = 3,8 \text{ (мм)}.$$

1.5 Розрахунок метрологічних характеристик витратоміра

Всі засоби вимірювальної техніки, незалежно від їх конкретного виконання, мають ряд загальних властивостей, необхідних для виконання ними їх функціонального призначення.

Технічні характеристики, що описують ці властивості і впливають на результати і на похибки вимірювань, називаються метрологічними характеристиками. Комплекс нормованих метрологічних характеристик встановлюється таким чином, щоб з їх допомогою можна було оцінити похибку вимірювань, що здійснюються в відомих робочих умовах експлуатації за допомогою окремих засобів вимірювальної техніки або сукупності засобів вимірювань, наприклад автоматичних вимірювальних систем.

Статична характеристика. Однією з основних метрологічних характеристик вимірювальних перетворювачів є статична характеристика. Вона

встановлює залежність $y = f(x)$ інформативного параметра у вихідного сигналу вимірювального перетворювача від інформативного параметра x вхідного сигналу.

Статична характеристика нормується шляхом завдання в формі рівняння, графіка або таблиці. Поняття статичної характеристики можна застосувати і до вимірювальних приладів, якщо під незалежною змінною x розуміти значення вимірюваної величини або інформативного параметра вхідного сигналу, а під залежною величиною y - показання приладу.

Математична модель ультразвукового витратоміра (1.4), яка була виведена в розділі 3 буде використана для розрахунку і побудови графіків статичної характеристики. Вона має такий вигляд [3, 4]

$$\Delta\tau = \varphi \frac{2L}{F c^2} Q$$

де F – площа живого перерізу потоку, φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкості за перерізом потоку.

Щоб розрахувати статичну характеристику $f(Q) = \Delta\tau$, необхідно визначити коефіцієнт φ .

Як видно з рисунку 1.18 на ділянці A розвивається максимальна швидкість потоку, тому на цій ділянці будемо розраховувати коефіцієнт φ :

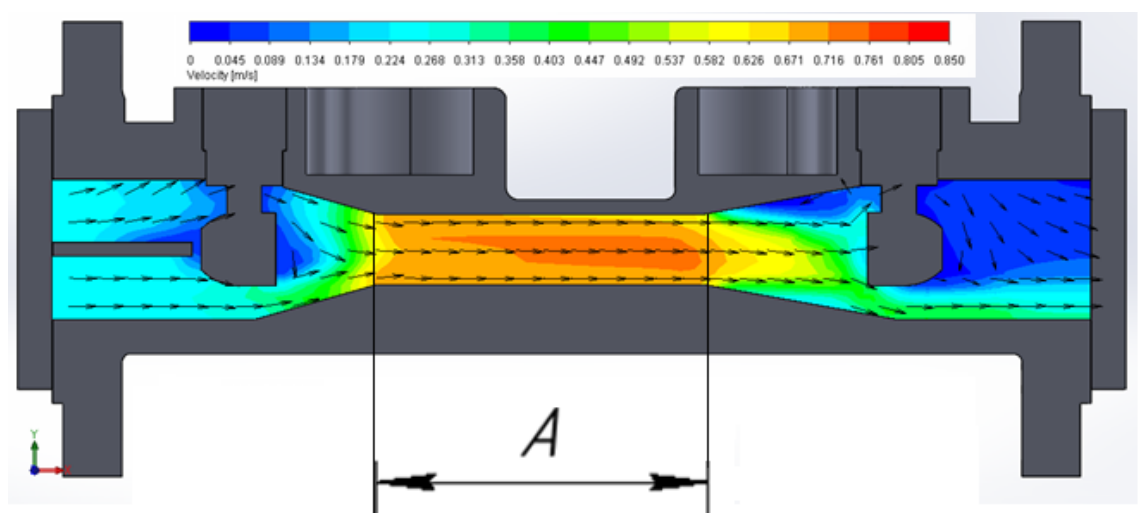


Рис. 1.18 Швидкість потоку на ділянці A .

$$\varphi = \frac{v_{\text{сеп}}}{v_{\text{max}}}, \quad (1.25)$$

де $v_{\text{сеп}}$ – середня швидкість потоку, v_{max} – максимальна швидкість потоку.

У свою чергу, середню швидкість потоку можна розрахувати за значенням витрати Q :

$$Q = v_{\text{сеп}} \cdot F ;$$

$$v_{\text{сеп}} = \frac{Q}{F}, \quad (1.26)$$

де $F = \pi r^2 = 0,0314 \text{ мм}^2$ – площа живого перерізу ділянки.

Підставивши (1.26) в формулу (1.25), отримуємо:

$$\varphi = \frac{\frac{Q}{F}}{v_{\text{max}}}. \quad (1.27)$$

Теоретично дослідивши в попередньому розділі потік води у витратомірі можна підставити в (1.27) вхідні та вихідні дані експерименту, виконаного в розділі 4, для розрахунку коефіцієнту φ

$$\varphi = \frac{\frac{0,000278}{0,0314}}{0,8} = 0,93. \quad (1.28)$$

З урахуванням (1.28) вираз для статичної характеристики набуває виду

$$\Delta\tau = 0,93 \frac{2L}{F c^2} Q$$

Графік статичної характеристики витратоміра з урахуванням геометричних особливостей гідравлічного каналу (таблиця 1.3) наведено на рис. 1.19.

Таблиця 1.3 Геометричні характеристики гідравлічного каналу

Параметр	Значення
Відстань між датчиками, L [м]	0.19
Швидкість звуку в середовищі, С [м/с]	1500
Площа живого перерізу ділянки, F [м ²]	0,0314



Рис. 1.19 Статична характеристика.

Втрата тиску. Для визначення втрати тиску у первинному перетворювачі витрати необхідно провести гідравлічний розрахунок конструкції (Рис. 1.20).

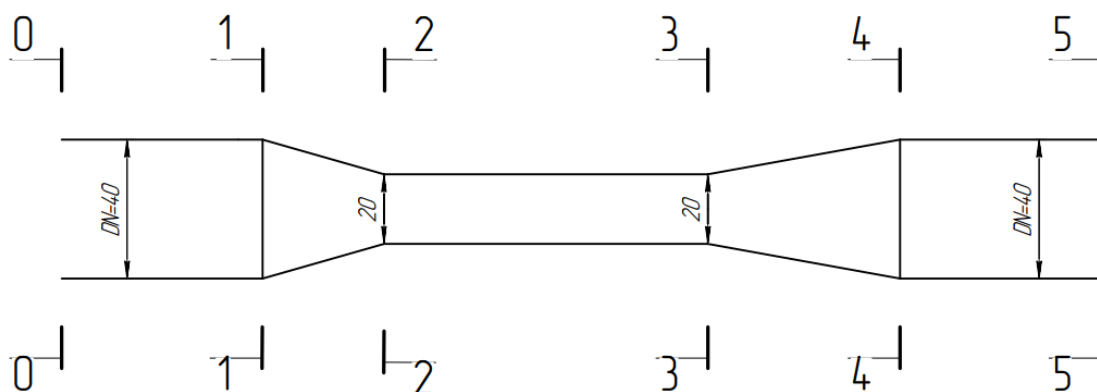


Рис. 1.20 Гідравлічна конструкція

Ділянка між перерізами 0-0 і 1-1 є прямою, отже втрата тиску на ній обумовлена тільки тертям за довжиною і визначається залежністю Дарсі-Вейсбаха для круглих трубопроводів [17].

$$h_l = \frac{\lambda_t}{4R_r} \cdot \frac{v_{\text{сер}}^2}{2g} l, \quad (1.29)$$

де λ_t – лінійний коефіцієнт опору тертя, залежний від режиму руху вимірюваного потоку; R_r – гідравлічний радіус; $v_{\text{сер}}$ – середня швидкість потоку у перерізі; l – довжина ділянки [17, 18].

Для розвинутого турбулентного току λ_t – дорівнює

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{0,25}},$$

де Re – число Рейнольдса який розраховується за такою формулою

$$Re = \frac{v_{\text{сер}} \chi}{\nu},$$

де ν – кінетичний коефіцієнт в'язкості; χ – характерний лінійний розмір перерізу.

З урахуванням (1.29) для статичного тиску у перерізі 1-1 можна записати

$$P_1 = P_0 - h_{l_{01}},$$

де індекс 01 – ділянка між перерізом 0-0 і 1-1 [17, 18]

Ділянка між перерізами 1-1 і 2-2 являє собою конфузор. Відповідно до рівняння Бернуллі статичний тиск у перерізі 2-2 визначається за виразом [17, 18]

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho v_{\text{сер}1}^2}{2} \left(1 - \frac{S_{\text{ж}1}^2}{S_{\text{ж}2}^2} (1 + \xi_{12}) \right),$$

де $S_{\text{ж}i}$ – площа i -го живого перерізу; ρ – густина вимірюваного середовища; ξ_{ij} – коефіцієнт гідравлічного опору на ділянці між перерізами i та j який розраховується за формулою [17, 18]

$$\xi_{12} = \frac{\lambda_{\text{конф}}}{8 \sin \frac{\gamma}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right),$$

де $\lambda_{\text{конф}}$ – коефіцієнт опору тертя; n – степінь розширення потоку.

Для випадку що розглядається n , $\lambda_{\text{конф}}$ та $\frac{\gamma}{2}$ розраховуються за

$$n = \frac{R_2^2}{R_1^2} ;$$

$$\lambda_{\text{конф}} = \frac{0,3164}{Re_2^{0,25}} ;$$

$$\frac{\gamma}{2} = \arctg \left(\frac{R_1 - R_2}{L_{12}} \right) ,$$

де Ri – радіус i -го перерізу.

Відрізок гідравлічного каналу між перерізами 2-2 і 3-3 являє собою пряму ділянку. Тому втрати тиску тут обумовлені тертям за довжиною потоку [17, 18].

$$P_3 = P_2 - h_{l_{23}},$$

де величина $h_{l_{23}}$ – визначається за виразом (1.29)

Ділянка 3-4 є дифузором, тому для статичного тиску у перерізі 4-4 можна записати [17, 18]

$$P_4 = P_3 + \frac{\rho v_{\text{сер}3}^2}{2} \left(1 - \frac{S_{\text{ж}3}^2}{S_{\text{ж}4}^2} (1 + \xi_{34}) \right) .$$

Коефіцієнт місцевого опору дифузора відповідно до [17, 18] визначається так

$$\xi_{34} = \frac{\lambda_{\text{конф}}}{8 \sin \frac{\gamma}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + \sin \gamma \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) .$$

У досліджуваному випадку

$$n = \frac{R_4^2}{R_3^2} ;$$

$$\gamma = 2 \arctg \left(\frac{R_4 - R_3}{L_{34}} \right) ;$$

$$\lambda_{\text{конф}} = \frac{0,3164}{Re_4^{0,25}}.$$

Статичний тиск у перерізі 5-5 визначається за виразом [17, 18]

$$P_5 = P_4 - h_{l_{45}},$$

де величина $h_{l_{45}}$ – визначається за виразом (1.29) з урахуванням особливостей відповідних перерізів.

Втрата тиску у гідравлічному каналі перетворювача витрати визначається різницею тисків у вихідному 5-5 і вхідному 0-0 перерізах за виразом [17, 18]

$$\Delta P = P_5 - P_1.$$

Всі розрахунки представлені в додатку А

1.6 Опис конструкції ультразвукових сенсорів

Сенсорні пристрої, що перетворюють електричний струм в хвилі ультразвуку, називаються ультразвуковими датчиками. Їх принцип дії аналогічний роботі радара, вони вловлюють ціль по відбитому сигналу. Швидкість звуку - величина постійна. На підставі цього таким датчиком обчислюється відстань до деякого об'єкту, відповідне діапазону часу між виходом сигналу і його поверненням.

Принцип роботи ультразвукових датчиків ґрунтується на взаємодії коливальних ультразвуку з вимірюваним середовищем. Ультразвукові коливання - це механічні коливання, які рухаються з частотою вище 20000 Гц, а відповідно більше верхньої межі коливальних звуку, яка сприймається людиною.

Поширення таких коливальних в газоподібних, рідких і твердих середовищах залежить від параметрів самого середовища. Швидкість передачі коливальних для газів дорівнює 200-1300 метрів в секунду, для твердих тіл 1500-8000 м / с, для рідких речовин 1100-2000 м / с [19].

Коефіцієнти відбиття хвиль ультразвуку відрізняються на границях різних

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовищ, так само як і їх здатність поглинання звуку. Тому ультразвукові датчики використовують для отримання інформації про різні неелектричні параметри за допомогою вимірювання властивостей коливань ультразвуку.

Ультразвукові способи вимірювання є електричними, так як збудження коливань і їх прийом здійснюється за допомогою струму. Найчастіше в датчиках застосовують п'єзоелементи, перетворювачі магнітострикційного виду. Для збудження коливань ультразвукової частоти застосовується ефект розтягування і стиснення п'єзокристала, званий зворотним п'єзоэффектом. Тому п'єзоелемент застосовується як в якості приймача коливань, так і в якості випромінювача [19].

Магнітострикційні датчики. Випромінювачі магнітострикційного виду (рис. 1.21) застосовують ефект деформації феромагнітів в магнітному полі. Випромінювач стрижневого виду виконаний у вигляді тонких листів феромагнетика, на якому намотана котушка збудження.

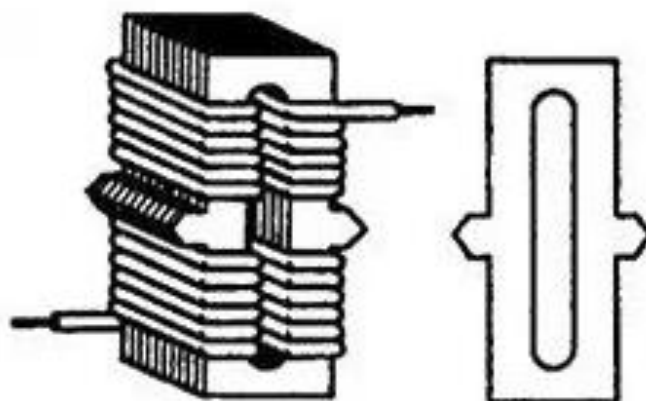


Рис. 1.21 Випромінювачі магнітострикційного виду

У магнітострикційних випромінювачах часто застосовуються сплави нікелю, ферити. При знаходженні феромагнітного стрижня в змінному магнітному полі, він буде розтягуватись, і стискатися з частотою поля. На рис. 1.22 показана залежність зміни довжини стрижня l від напруженості поля H . Так як напрямок поля не впливає на знак деформації, то частота деформації буде в 2 рази вище частоти поля збудження [19].

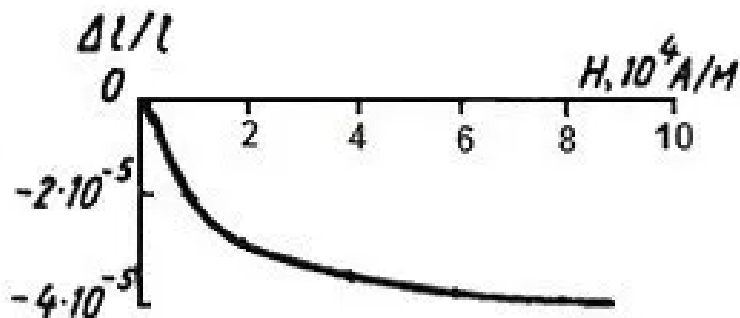


Рис. 1.22 Залежність зміни довжини стержня від напруженості поля

Щоб отримати значні механічні деформації застосовують додаткове підмагнічування стержня. Магнітострикційні випромінювачі діють в умовах резонансу, якщо частота поля збудження збігається з коливаннями стержня, що визначаються за формулою [19]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де l – довжина стержня, E – модуль пружності, ρ – густина.

Сенсори на основі п'єзоелемента. У випромінювачі на основі п'єзоелемента (Рис. 1.23) застосовується кварцова пластина, до якої підключено змінну напругу U_x , яка утворює електричне поле по осі x .

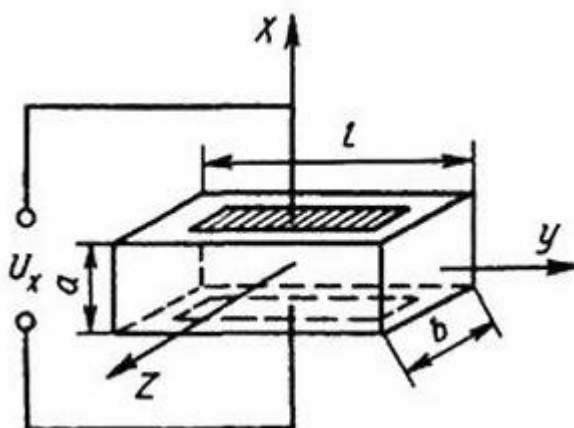


Рис. 1.23 Випромінювач на основі п'єзоелемента.

Зворотний ефект полягає в деформації пластини по осі Х. Відносне зміна розміру товщини пластини буде дорівнювати [19]

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{kU_x}{a}.$$

Поперечний ефект полягає в деформації пластини по осі У. Відносне зміна товщини пластини буде рівна

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{kU_x}{a}.$$

Розміри пластини не впливають на величину поздовжньої деформації. Поперечна деформація підвищується зі збільшенням співвідношення l / a . При різниці потенціалів до 2500 вольт є пряма залежність деформації і напруги. При високій нарузі деформація підвищується не так інтенсивно. Амплітуда коливань доходить до максимального значення, коли частота напруги і частота коливань пластини збігаються. Частота поздовжніх коливань обчислюється за такою формулою [19]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_x}{\rho}}.$$

Модуль пружності визначається по осі Х. Модуль пружності по осі У впливає на частоту поперечних коливань і визначається за наступною формулою [19]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}.$$

Якщо порівняти два розглянутих типу випромінювачів, то можна зробити висновок, що п'єзоелектричні випромінювачі можуть забезпечити більшу частоту коливань ультразвуку.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ

2.1 Опис конструкції приладу

Основою конструкції ультразвукового витратоміра (рис.2.1) є корпус на якому по два боки знаходяться отвори для приєднання в трубну систему. Всередині спеціально відведених отворів присутні два ультразвукових сенсори, які закріплюються фіксатором, та заземлювач. На вхідному отворі корпусу в паз встановлюється турбулізатор. До верхньої частини корпусу пригвинчується металева пластина, в яку встановлюються прокладки, через які проходять дроти, яка закриває отвори для сенсорів з дротами. В свою чергу до пластини закріплюється чорний пластмасовий корпус на який пригвинчується кришка.

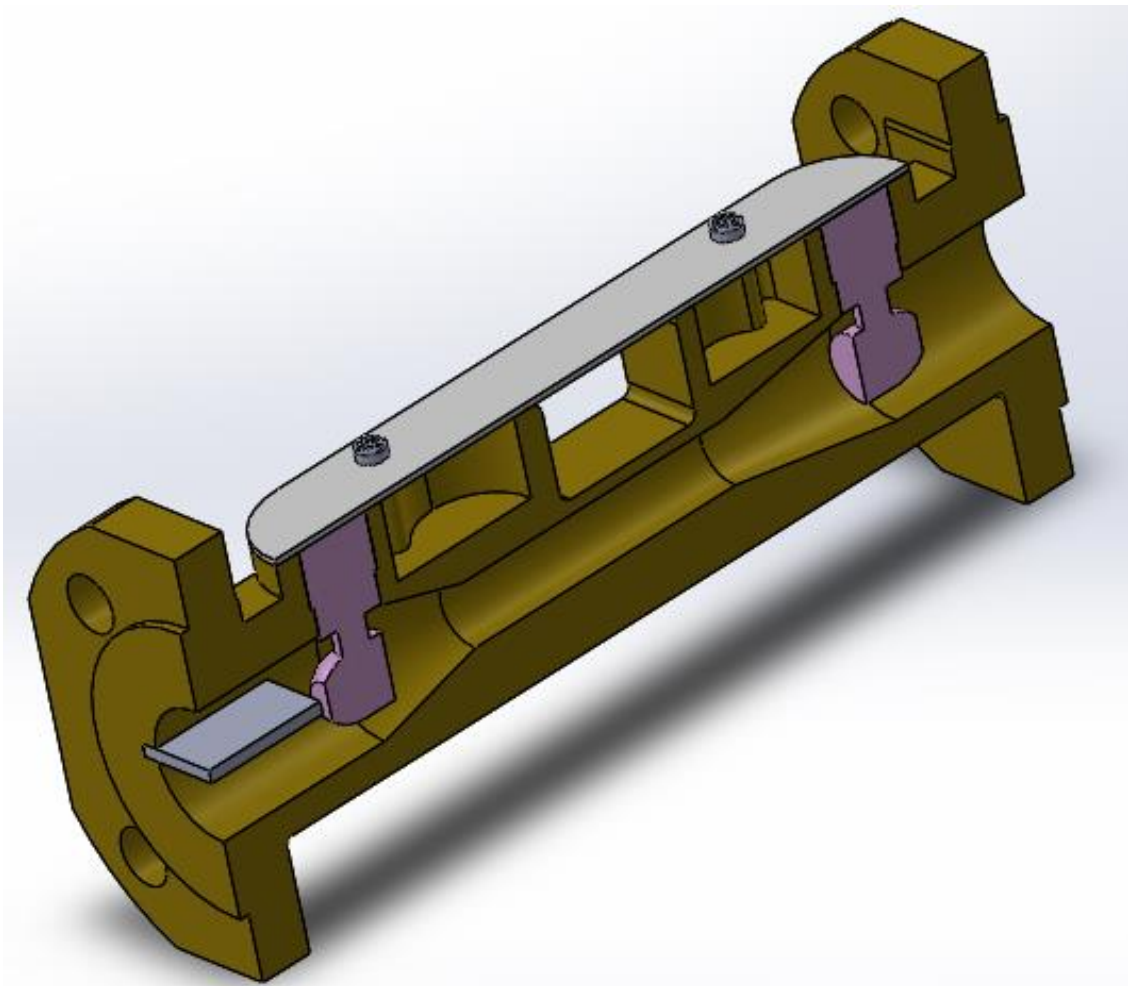


Рис. 2.1 Ультразвуковий витратомір

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ ПІ5113.000 ПЗ

Аркуш

44

2.2 Розрахунок критерії технологічності приладу

В поняття технологічності виробу при складанні входить: простота складання виробу загалом та складальних одиниць без пригонки та доробок, без селективного складання, яка забезпечується економічно доцільними допусками в розмірних, кінематичних та електричних ланцюгах. Технологічними виробами є ті, які забезпечують паралельність складання, можливість диференціації складання, найбільшу уніфікацію та нормалізацію деталей, можливість використання автоматизації процесів складання при найменшій кількості матеріалів та обладнання, що забезпечує скорочення виробничого циклу.

В таблицях 2.1, 2.2 та 2.3 відповідно представлено опис уніфікації деталей, складальних одиниць та операцій приладу

Таблиця 2.1 Уніфікація деталей приладу

№	Назва деталі	Кількість деталей	Уніфікація
1	Корпус	1	н/уніф.
2	Турбулізатор	1	н/уніф.
3	Основа	1	н/уніф.
4	Плата	1	н/уніф.
5	Пластина	1	н/уніф.
6	Прокладка	3	н/уніф.
7	Заземлювач	1	уніф.
8	Фіксатор	1	н/уніф.
9	Гвинт з скругленою головкою ГОСТ 7045-М3,5 X 8-Н	1	уніф.
10	Гвинт з скругленою головкою ГОСТ 7045-М3,5 x 12-Н	2	уніф.

Таблиця 2.2 Уніфікація складальних одиниць приладу

Назва складальної одиниці	Кількість деталей	Уніфікація
Сенсор	3	н/уніф.
Пластина в зборі	4	н/уніф.
Корпус в зборі	5	н/уніф.

Таблиця 2.3 Уніфікація операцій приладу

№	Назва операції	Уніфікація
1	Встановити	н/уніф.
2	Контролювати	н/уніф.
3	Загвинтити	уніф.

Критерій складності виробу. Розраховується критерій складності виробу за такою формулою:

$$K_{\text{скл}} = \frac{N_{\Sigma}}{n_{\Sigma}}, \quad (2.1)$$

де N_{Σ} - число основних складальних одиниць виробу;

n_{Σ} - число всіх деталей виробу по специфікації;

Значення критерія складності виробу знаходяться в таких діапазонах:

- $K_{\text{скл}} < 0,2$ – технологічність незадовільна;
- $0,2 < K_{\text{скл}} < 0,4$ – технологічність задовільна;
- $K_{\text{скл}} > 0,4$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.1) для знаходження критерію складності виробу отримуємо:

$$K_{\text{скл}} = \frac{3}{10} = 0,3.$$

Так як значення критерія технологічності знаходиться в діапазоні $0,2 < K_{\text{скл}} < 0,4$ то можна сказати, що технологічність за критерієм складності – задовільна.

Критерій уніфікації виробу. Розраховується критерій уніфікації виробу за такою формулою:

$$K_y = \frac{(N_y + n_y)}{(N_{\Sigma} + n_{\Sigma})}, \quad (2.2)$$

де N_y – число уніфікованих складальних одиниць;

n_y – число уніфікованих деталей;

Значення критерія уніфікації виробу знаходяться в таких діапазонах:

- $K_y < 0,25$ – технологічність незадовільна;
- $0,25 < K_y < 0,5$ – технологічність задовільна;
- $K_y > 0,5$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.2) для знаходження критерію уніфікації виробу отримуємо:

$$K_y = \frac{0+3}{3+10} = 0,25.$$

Так як значення критерія уніфікації виробу знаходиться в діапазоні $0,25 < K_y < 0,5$ то можна сказати, що технологічність за критерієм уніфікації виробу – задовільний.

Показник уніфікації складальних одиниць. Показник уніфікації складальних одиниць розраховується за такою формулою:

$$K_{yco} = \frac{N_y}{N_{\Sigma}}. \quad (2.3)$$

Значення показника уніфікації складальних одиниць знаходяться в таких діапазонах:

- $K_{yco} < 0,2$ – технологічність незадовільна;
- $0,2 < K_{yco} < 0,4$ – технологічність задовільна;
- $K_{yco} > 0,4$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.3) для знаходження показника уніфікації складальних одиниць отримуємо:

$$K_{yco} = \frac{0}{3} = 0.$$

Так як значення критерія уніфікації складальних одиниць знаходиться в діапазоні $K_{yco} < 0,2$ то можна сказати, що технологічність за показником уніфікації складальних одиниць – незадовільна.

Показник уніфікації деталей. Показник уніфікації деталей розраховується за такою формулою:

$$K_{уд} = \frac{n_y}{N \Sigma}. \quad (2.4)$$

Значення показника уніфікації деталей знаходяться в таких діапазонах:

- $K_{уд} < 0,3$ – технологічність незадовільна;
- $0,3 < K_{уд} < 0,6$ – технологічність задовільна;
- $K_{уд} > 0,6$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.4) для знаходження показника уніфікації деталей отримуємо:

$$K_{уд} = \frac{3}{3} = 1.$$

Так як значення показника уніфікації деталей знаходиться в діапазоні $K_{уд} > 0,6$, то можна сказати, що технологічність за показником уніфікації деталей – добра.

Показник уніфікації технологічного процесу. Показник уніфікації технологічного процесу розраховується за такою формулою:

$$K_{утп} = \frac{K_{ун.опер}}{K_{заг.опер}}. \quad (2.5)$$

Значення показника уніфікації технологічного процесу знаходяться в таких діапазонах:

- $K_{утп} < 0,5$ – технологічність незадовільна;

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- $0,5 < K_{\text{утп}} < 0,75$ – технологічність задовільна;
- $K_{\text{утп}} > 0,75$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.5) для знаходження показника уніфікації технологічного процесу отримуємо:

$$K_{\text{утп}} = \frac{1}{3} = 0,3.$$

Так як значення показника уніфікації технологічного процесу знаходиться в діапазоні $K_{\text{утп}} < 0,5$, то можна сказати, що технологічність за показником уніфікації технологічного процесу – незадовільна.

Комплексний показник уніфікації виробу. Комплексний показник уніфікації виробу розраховується за такою формулою:

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (2.6)$$

де n – загальна кількість показників технологічності;

Значення комплексного показника уніфікації виробу знаходяться в таких діапазонах:

- $K_{\Sigma} < 0,3$ – технологічність незадовільна;
- $0,3 < K_{\Sigma} < 0,5$ – технологічність задовільна;
- $K_{\Sigma} > 0,5$ – технологічність добра;

Підставивши значення в формулу (2.6) для знаходження комплексного показника уніфікації виробу отримуємо:

$$K_{\Sigma} = \frac{0,3 + 0,25 + 0 + 1 + 0,3}{5} = 0,37.$$

Так як значення комплексного показника уніфікації виробу знаходиться в діапазоні $0,3 < K_{\Sigma} < 0,5$, то можна сказати, що технологічність за показником уніфікації технологічного процесу – задовільна.

Отже, в результаті розрахунків було отримано задовільну технологічність приладу. Однак деякі окремі показники є незадовільними, що негативно вплине на виробництво та збільшить час на виготовлення всього приладу.

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розрахунок параметричної точності складання

До приладів пред'являються певні вимоги по точності показань або на вихідні параметри за заданих умов експлуатації. При цьому повинна забезпечуватися надійність роботи приладу та необхідний термін його роботи. Всі ці вимоги забезпечуються правильним і обґрунтованим вибором принципової схеми приладу та його конструкції, а також технологією виготовлення деталей і складання приладу. Однією з основних умов технологічності конструкції приладу при виконанні його складання в серійному і масовому виробництві є взаємозамінність складальних одиниць і деталей.

Нехай при складанні ультразвукового витратоміра (рис. 2.2) необхідно забезпечити зазор між сенсором та турбулізатор. Ця вимога повинна бути забезпечена в умовах серійного виробництва за рахунок постановки економічно виправданих допусків на деталі витратоміра. Схема розмірного ланцюга показана на рис. 2.3.

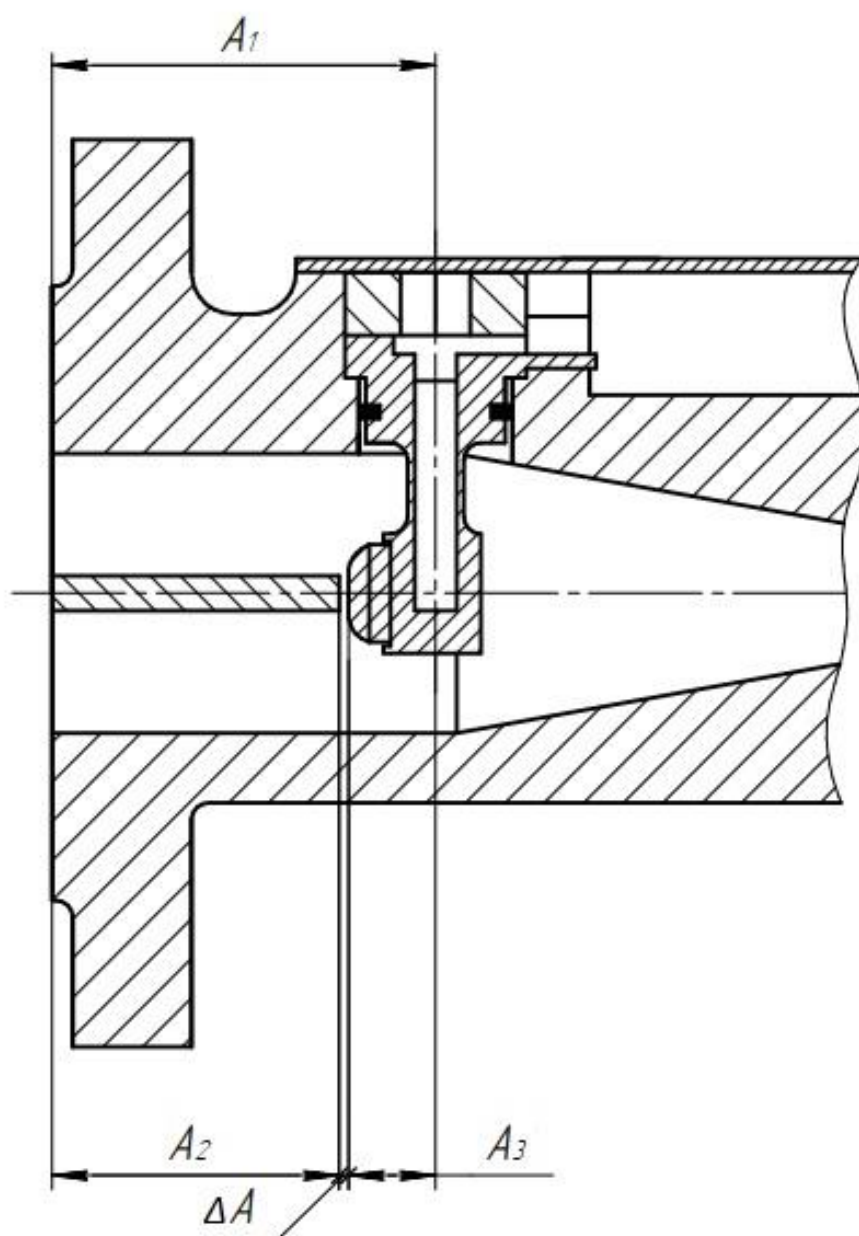


Рис. 2.2 Ультразвуковий витратомір

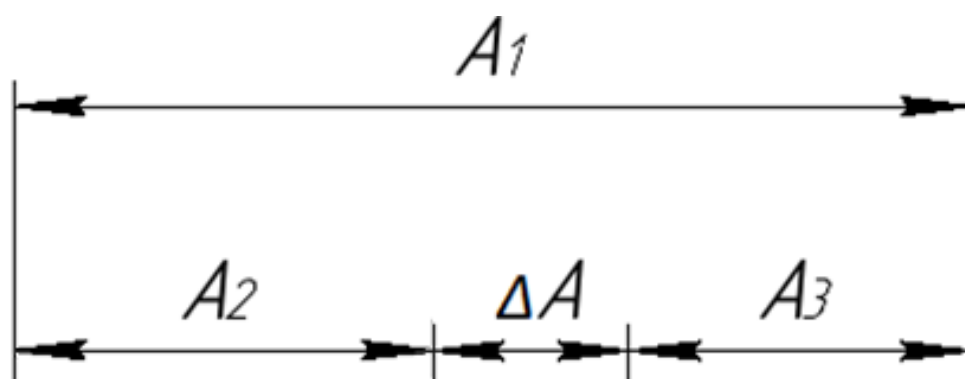


Рис. 2.3 Схема розмірного ланцюга

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДПБ ПІ5113.000 ПЗ

Аркуш

51

У таблиці 2.4 наведено номінальні значення ланок розмірного ланцюга та їх допустимі відхилення, які взяті з креслення ультразвукового витратоміра.

Таблиця 2.4 Номінальні значення ланок розмірного ланцюга

Ланка	Номінальний розмір, мм	Допуск, мм	Координати середини допуску	Тип ланки
A1	55	0 -0,019	-0,0095	Збільшуюча
A2	41	+0,025 0	0,0125	Зменшуюча
A3	12	-0,016 -0,034	-0,025	Зменшуюча

Розв'яжемо пряму задачу, яка полягає в визначенні номінального розміру і допуску замикаючої ланки.

В даному розмірному ланцюзі ланка A_1 - збільшуюча ланка, а ланки A_2 , A_3 - зменшуючі. Оскільки всі ланки розмірного ланцюга паралельні, то номінальний розмір замикаючої ланки дорівнює

$$A_{зам} = \sum_{i=1}^3 A_i - \sum_{i=4}^{10} A_i = 55 - (12 + 44) = 2(мм).$$

В свою чергу допуск замикаючої ланки дорівнює

$$\delta_{зам} = \sum_{i=1}^{10} |\delta_i| = (0,019 + 0,018 + 0,025) = 0,062(мм).$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки визначається як

$$K_{зам} = \sum_{i=1}^3 K_i - \sum_{i=4}^{10} K_i = -0,0095 - (0,0125 + 0,025) = -0,003(мм).$$

Верхнє і нижнє відхилення розміру замикаючої ланки дорівнюють

$$(BB)_{зам} = K_{зам} + 0,5\delta_{зам} = -0,003 + 0,5 \times 0,062 = 0,028(мм);$$

$$(HB)_{зам} = K_{зам} - 0,5\delta_{зам} = -0,003 - 0,5 \times 0,062 = -0,034(мм).$$

Таким чином, у разі повної взаємозамінності замикаюча ланка $A_{зам}$ дорівнює

$$A_{зам} = (2^{+0,028}_{-0,034}) \text{ мм.}$$

Визначимо допуск замикаючої ланки імовірнісним методом (методом неповної взаємозамінності)

$$\delta_{зам} = K \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (\delta_i)^2}.$$

Припускаючи, що закони розподілу складових розмірів ланцюга є нормальними, то поле розсіювання замикаючої ланки дорівнює

$$\delta_{зам} = K \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (\delta_i)^2} = \sqrt{0,062} = 0,25(мм).$$

З урахуванням коефіцієнтів відносного розсіювання розмірів α_i , значення яких для ланок розмірного ланцюга дорівнюють

$$\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0; \alpha_3 = 0;$$

Визначимо координату середини поля розсіювання замикаючої ланки як:

$$\Delta K_{замнеп} = \sum_{i=1}^1 (\Delta K_i + 0,5\alpha_i\delta_i) - \sum_{i=2}^3 (\Delta K_i + 0,5\alpha_i\delta_i) = -0,022(мм).$$

Верхня і нижня границі поля розсіювання замикаючої ланки дорівнюють

$$(BB)_{замнеп} = \Delta K_{замнеп} + \frac{\delta_{зам}}{2} = -0,022 + \frac{0,25}{2} = 0,103(мм);$$

$$(HB)_{замнеп} = \Delta K_{замнеп} - \frac{\delta_{зам}}{2} = -0,022 - \frac{0,25}{2} = -0,147(мм).$$

Таким чином, при неповній (часткової) взаємозамінності замикаюча ланка має такий розмір

$$A_{замнеп} = (1^{+0,103}_{-0,147}) \text{ мм.}$$

2.4 Проектування технологічного процесу складання

Проектування технологічного процесу складання включає в себе вибір найбільш раціональних процесів і способів складання, визначення послідовності з'єднання деталей і складальних одиниць, регулювання і контролю виробу (або складальної одиниці) з призначенням обладнання, робочого і вимірювального інструменту.

Загальні правила розробки технологічного процесу регламентовані ГОСТ 14.301-73.

Аналізуючи об'єкт складання необхідно звернути увагу на наступні особливості:

- ступінь розчленування виробу;
- характер з'єднання окремих деталей.

Необхідність розчленування приладу на окремі складальні одиниці визначається в першу чергу умовами роботи та експлуатації, можливістю виготовлення і з'єднання деталей.

Розчленування виробу на складальні одиниці може проводитися і з технологічних міркувань – кількість складальних одиниць в приладі, визначає можливість скорочення трудомісткості і тривалості (циклу) складання за рахунок створення умов для виконання складальних операцій, розділення процесу складання на паралельні потоки, автоматизації і механізації процесу.

Після такого аналізу приладу проводиться розробка послідовності складання, послідовності і змісту кожної операції, оформлення технологічної документації.

Проектування технологічного процесу складання складається з наступних етапів:

- на основі аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу і технологічна схема складання;
- визначається організаційна форма складання з урахуванням конструктивних особливостей виробу, річної програми випуску,

умов взаємозамінності тощо;

- виконується вибір методу складання виходячи з вимог взаємозамінності і прийнятою організаційною формою складання;
- розробляється технологічний маршрут складання;
- вибирається обладнання робочих місць в відповідності до призначених складальних операцій;
- підбирається універсальна та проектується спеціальна технологічна оснастка;
- для виконання складальних операцій підбираються допоміжні матеріали (припій, флюс, клей тощо);
- проводиться нормування та визначається розряд роботи для кожної операції.[4]

Проектування схеми ступенів складання. Створенню технологічного процесу складання передуює розробка схеми ступенів складання та технологічної схеми складання, які є підготовчим етапом у проектуванні всього технологічного процесу складання.

Структурна схема складання виробу отримується на основі аналізу конструкторської документації: креслень, специфікацій, комплектувальних відомостей і технічних умов. Виріб розчленовується на окремі компоненти складання – складальні одиниці та деталі. Залежно від складності ці елементи розміщують за ступенями схеми складання.

До складу приладу входять 10 деталей: корпус, турбулізатор, основа, плата, пластина, прокладка, заземлювач, фіксатор, гвинт 1, гвинт 2, гвинт 3, деякі з них формують складальні одиниці: пластина в зборі, корпус в зборі; складальна одиниця – сенсор.

Проектування технологічної схеми складання. Схема містить окремі гілки вузлових складань і загального складання приладу. Кожна гілка починається з базової деталі, або з базового вузла, за які беруть складні базові деталі або складальні одиниці нижчих ступенів складання. Складальний процес

зображується на схемі лінією зліва – направо. Розглядаючи гілки складання складальної одиниці вищого ступеня складання даного приладу, схему розвертають за годинниковою стрілкою на 90° , а будуючи гілки складання складальних одиниць нижчих ступенів, які входять до складніших складальних одиниць, додатково обертають у той самий бік. Знизу на лінію складання подаються складальні одиниці нижчих ступенів складання та основні деталі приладу, а згори – стандартні та нормалізовані деталі.

Схема ступенів складання та технологічна схема складання представлені відповідно в додатку Б та В.

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ВИСНОВКИ

У проектно-конструкторському розділі проаналізовано ультразвукові методи вимірювання витрати, їх переваги і недоліки, розроблено схему вимірювання на підґрунті наявних особливостей час-імпульсного методу. Визначено метрологічні характеристики приладу, а саме статичної характеристики перетворення, перепаду тиску.

Робота, проведена в результаті виконання технологічного розділу, дозволяє зробити певні висновки щодо складності виготовлення даного витратоміра. Оцінка технологічності даного виробу показала задовільні результати за показником уніфікації використовуваних складальних процесів та деталей. За показником коефіцієнту уніфікації складальних одиниць та цілісності конструкції були отримані низькі результати. Ці показники, а також схема складального складу і технологічна схема складання виробу свідчать про складність виготовлення даного приладу на підприємстві.

					ДПБ ПІ5113.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара/ К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.
2. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям/ В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. Кн. 1/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: Кн. 2/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
5. Биргер Г.И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры./Биргер Н.И. – М.: Металлургия, 1964. – 323с.
6. ДСТУ 3339–96. Теплосчетчики. Общие технические требования. – К.: Госстандарт Украины, 1996. – 9 с.
7. Texas Instruments TDC7200.URL [Электронный ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tdc7200.pdf>
8. Texas Instruments TDC1000.URL [Электронный ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступа: <http://www.ti.com/product/TDC1000/technicaldocuments>
9. MAX 35101. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX35101.pdf>
10. ACAM TDC. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступа: http://www.acam.de/fileadmin/Download/pdf/Englisch/DB_GP22_e.pdf
11. Texas Instruments MSP430. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт].– Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2231-ep.pdf>
12. ATmega168. [Электронный ресурс] : Atmel [Веб-сайт].– http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bitAVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-datasheet_Complete.pdf

13. Silicon Labs C8051. [Электронный ресурс] : Silicon Labs [Веб-сайт].—
<https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F35x.pdf>
 f Режим доступа: Вільний
14. Триандафилов, А. Ф. Гидравлика и гидравлические машины : учебное
 пособие / А. Ф. Триандафилов, С. Г. Ефимова ; Сыкт. лесн. ин-т.—
 Сыктывкар : СЛИ, 2012. – 212 с.
15. [Электронный ресурс] :Wikipedia [Веб-сайт].—
<https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> Режим доступа: Вільний
16. Писаренко Г. С., Яковлева А. П., Матвеев В. В. Справочник по
 сопротивлению материалов ; Отв. ред. Писаренко Г. С. – 2-е изд., перераб.
 и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
17. Рабинович Е.З. Гидравлика 4-е издание. — Москва: Государственное
 Издательство физико-математической литературы, 1963. – 404 с.
18. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред.
 М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение,
 1992.— 672 с
19. [Электронный ресурс] : Електросам [Веб-сайт].—
[https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/ultrazvukovye-](https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/ultrazvukovye-datchiki/)
 datchiki/ Режим доступа: Вільний

Додатки

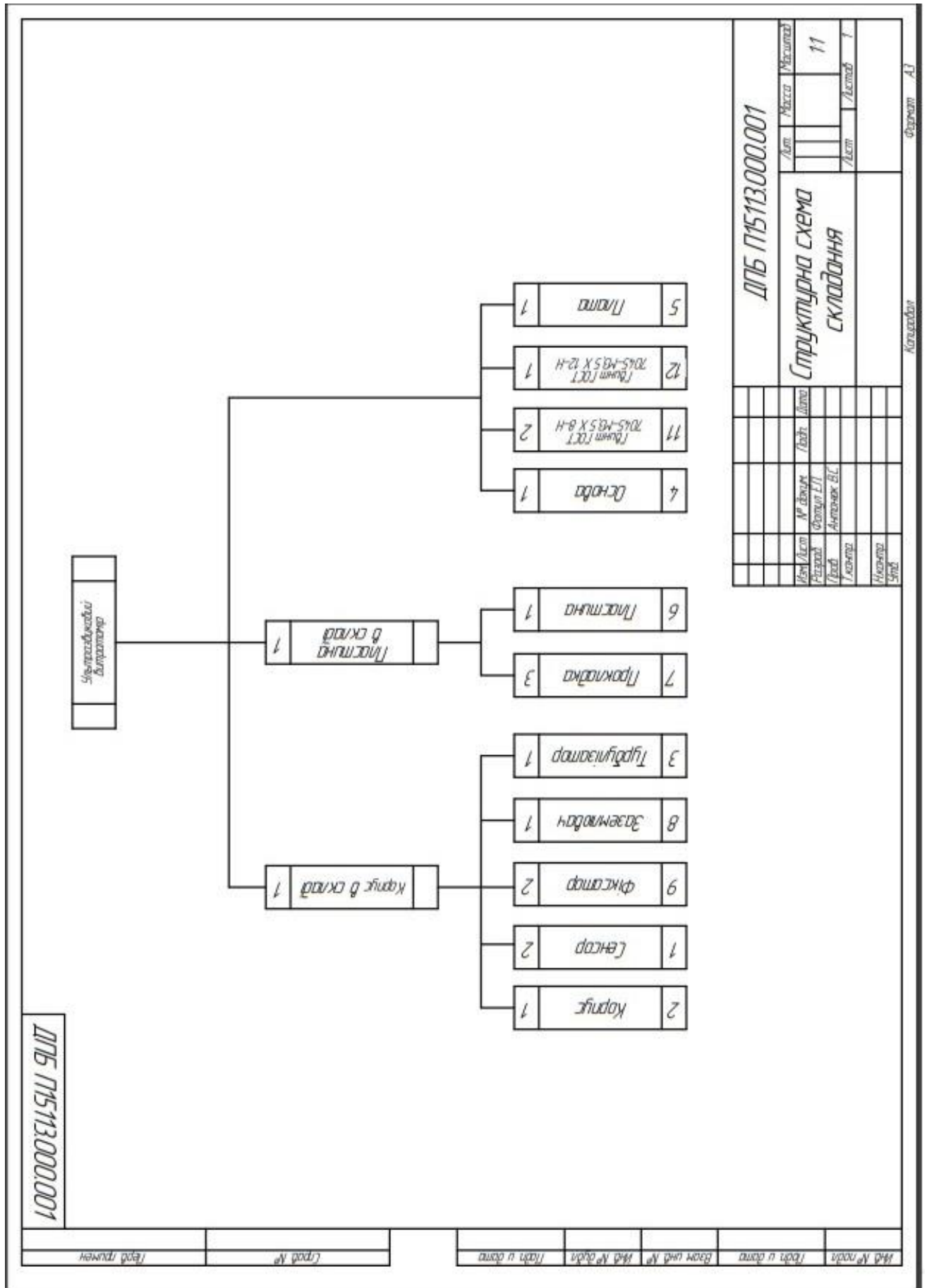
Додаток А

$$\begin{aligned}
 p0 &:= 25000000 & l1 &:= 0.58 & g &:= 9.8 \\
 Q &:= 0.000278 & l2 &:= 0.35 & v &:= 0.010 \cdot 10^{-4} \\
 r1 &:= 0.2 & r4 &:= r1 & l3 &:= 0.935 \\
 r2 &:= 0.1 & r3 &:= r2 & l4 &:= 0.555 \\
 \rho &:= 1000 & l5 &:= l1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S1 &:= \pi \cdot r1^2 & V_{ser1} &:= \frac{Q}{S1} & x1 &:= r1 & Re1 &:= \frac{V_{ser1} \cdot x1}{v} & \lambda l1 &:= \frac{0.3164}{Re1^{0.25}} \\
 S2 &:= \pi \cdot r2^2 & & & & & & & & \\
 S3 &:= S2 & V_{ser2} &:= \frac{Q}{S2} & x2 &:= r2 & Re2 &:= \frac{V_{ser2} \cdot x2}{v} & \lambda l2 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} \\
 S4 &:= S1 & & & & & & & & \\
 & & V_{ser3} &:= V_{ser2} & x3 &:= x2 & Re3 &:= \frac{V_{ser3} \cdot x3}{v} & \lambda l3 &:= \frac{0.3164}{Re3^{0.25}} \\
 Rr1 &:= \frac{r1}{2} & V_{ser4} &:= V_{ser1} & x4 &:= x1 & Re4 &:= \frac{V_{ser4} \cdot x4}{v} & \lambda l4 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} \\
 Rr2 &:= \frac{r2}{2} & & & & & & & & \\
 Rr3 &:= Rr2 & & & & & & & & \\
 Rr4 &:= Rr1 & & & & & & & &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 hl01 &:= \frac{\lambda l1}{4 \cdot Rr1} \cdot \frac{V_{ser1}^2}{2 \cdot g} \cdot l1 = 2.498 \cdot 10^{-8} & \lambda_{\text{коэф}} 1 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} \\
 p1 &:= p0 - hl01 = 2.5 \cdot 10^6 & n1 &:= \frac{r2^2}{r1^2} \\
 & & \gamma 1 &:= 2 \cdot \text{atan} \left(\frac{r1 - r2}{l2} \right) \\
 \xi 12 &:= \frac{\lambda_{\text{коэф}} 1}{8 \cdot \sin \left(\frac{\gamma 1}{2} \right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n1^2} \right) \\
 p2 &:= p1 + \frac{\rho \cdot V_{ser1}^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S1^2}{S2^2} \cdot (1 + \xi 12) \right) = 2.5 \cdot 10^6 & \lambda_{\text{коэф}} 2 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} \\
 hl23 &:= \frac{\lambda l3}{4 \cdot Rr3} \cdot \frac{V_{ser3}^2}{2 \cdot g} \cdot l3 & n2 &:= \frac{r4^2}{r3^2} \\
 & & \gamma 2 &:= 2 \cdot \text{atan} \left(\frac{r4 - r3}{l2} \right) \\
 p3 &:= p2 - hl23 = 2.5 \cdot 10^6 \\
 \xi 34 &:= \frac{\lambda_{\text{коэф}} 2}{8 \cdot \sin \left(\frac{\gamma 2}{2} \right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n2^2} \right) \\
 p4 &:= p3 + \frac{\rho \cdot V_{ser3}^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S3^2}{S4^2} \cdot (1 + \xi 34) \right) = 2.5 \cdot 10^6 & hl45 &:= \frac{\lambda l4}{4 \cdot Rr4} \cdot \frac{V_{ser4}^2}{2 \cdot g} \cdot l4 \\
 p5 &:= p4 - hl45 = 2.5 \cdot 10^6 & \Delta P &:= p5 - p1 = 0.015
 \end{aligned}$$

Додаток Б



Додаток В

